

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Diagnostika izolačních systémů energetických zařízení

Diagnostic of Insulation Systems of Electric Power Devices

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Stanislavovi Mišákovi, Ph.D. za trpělivost, pomoc a užitečné rady, které mi poskytnul při tvorbě mé diplomové práce.

Odevzdání 6. 5. 2011

Václav Urbiš

Abstrakt

Diplomová práce pojednává o diagnostice izolačního systému v různých klimatických podmínkách. V první části jsou vysvětleny a popsány jednotlivé metody diagnostiky izolačního systému. Dále se diplomová práce věnuje izolačnímu systému elektrických strojů. Zde jsou uvedeny materiály a skladba jednotlivých složek izolantů pro jednotlivé elektrické stroje. Zbývá část se zabývá analýzou izolačního systému v různých klimatických podmínkách. V těchto kapitolách jsou uvedeny rozborů a výsledky jednotlivých měření, společně s aktuálním stavem zkoušeného elektrického stroje.

Klíčová slova

Diagnostika, izolační systém, klimatické podmínky, analýza izolačního systému

Abstrakt

The thesis deals with the diagnosis of insulation systems in different climatic conditions. The first section explains and describes the various methods to diagnose the insulation system. Furthermore, the thesis deals with insulation of electrical machines. Here are the materials and structure of individual components of an insulating material for various electrical machines. The remaining part is the analysis of insulation systems in different climatic conditions. In these chapters present the results of tests and measurements, along with the current state of electrical test equipment.

Keywords

Diagnostic, insulation system, climatic conditions, analysis of insulation system

Seznam zkratk a symbolů

a	konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul	ΔU	napěťový interval
B	materiálová konstanta	W_a	aktivační energie procesu
C	kapacita	Z_m	měřicí impedance
C_2	kapacita při frekvenci 2 Hz	η_0	odchylka od Ohmova zákona
C_{50}	kapacita při frekvenci 50 Hz	ζ	dynamická časová konstanta
C_V	vazební kondenzátor	$\text{tg}\delta$	ztrátový činitel
C_a	kapacita měřeného objektu	τ	životnost izolace
DAR	koeficient dielektrické absorpce		
DD	test vybíjení dielektrika		
E	intenzita elektrického pole		
I	proud		
ΔI	diference proudu v napěťovém intervalu		
i_{15}	proud v patnácté sekundě		
i_{60}	proud v šedesáté sekundě		
i_{oo}	vodivostní ustálený proud		
i_{abs}	absorpční proud		
i_t	okamžitý proud		
$K(f)$	plocha obrazce pod křivkou		
KK	klimatická komora		
P_{pKf}	celková velikost plochy pod křivkou		
p_{i1}	jednominutový polarizační index		
p_{i10}	desetiminutový polarizační index		
R_X	izolační odpor		
RRK	reduované resorpční křivky		
R_{60}	odpor v šedesáté sekundě		
R_{15}	odpor v patnácté sekundě		
R_0	izolační odpor stroje		
R	univerzální plynová konstanta		
SF_6	fluorid sírový		
t	čas		
T	absolutní teplota		
U	napětí		

Obsah

1	Metody diagnostiky izolačního systému	2
1.1	Absorpční a resorpční charakteristiky	2
1.1.1	Izolační odpor.....	2
1.1.2	Polarizační indexy	3
1.1.3	Redukované resorpční křivky.....	3
1.2	Vybrané metody měření odporu	5
1.2.1	Poměrná odchylka průběhu izolačního proudu od Ohmova zákona	6
1.2.2	Dynamická časová konstanta	7
1.2.3	Ztrátový činitel.....	8
1.2.4	Měření poměru kapacit C2/C50	9
1.3	Napět'ové zkoušky	9
1.3.1	Zkouška atmosférickým impulsním napětím	9
1.3.2	Impulsní srovnávací zkouška	10
1.4	Částečné výboje.....	12
1.4.1	Rozbor částečných výbojů.....	12
1.4.2	Galvanická metoda měření částečných výbojů	13
1.5	Přehled diagnostických metod.....	17
2	Izolační systém elektrických strojů.....	18
2.1	Izolační systémy transformátorů.....	18
2.2	Izolační systémy nízkonapět'ových točivých strojů	19
2.3	Izolační systém vysokonapět'ových točivých strojů.....	19
2.4	Tepelné stárnutí a určení tepelné odolnosti.....	20
2.5	Elektrické modely stárnutí.....	21
3	Analýza izolačního systému elektrického zařízení v různých klimatických podmínkách.....	23
3.1	Popis elektrického zařízení	23
3.1.1	Pružinová brzda 2LM8 020-4NA10.....	26
3.2	Popis klimatické komory.....	28
3.3	Měření a zpracování dat	30
3.3.1	Návrh doby a způsobu měření.....	30
3.3.2	Sledované parametry měření	31
3.4	Měření asynchronního motoru nakrátko ve stavu naprázdno při teplotě -20 °C.....	33
3.4.1	Impulsní srovnávací zkouška po 80 hodinách chodu ve stavu naprázdno při teplotě -20°C ...	37
3.5	Měření asynchronního motoru nakrátko ve stavu naprázdno při teplotě 40 °C.....	39

3.5.1	Impulsní srovnávací zkouška po 20 hodinách chodu ve stavu naprázdno při teplotě 80°C.....	44
3.6	Měření asynchronního motoru nakrátko ve stavu naprázdno při teplotě 20 °C.....	47
3.6.1	Impulsní srovnávací zkouška po 80 hodinách chodu ve stavu naprázdno při teplotě 20°C.....	50
3.7	Měření asynchronního motoru nakrátko v zatíženém stavu	53
3.7.1	Impulsní srovnávací zkouška po 8 hodinách v zatíženém stavu	57
3.8	Proudová spektra asynchronního motoru nakrátko při chodu naprázdno	60
3.9	Proudová spektra asynchronního motoru nakrátko v zatíženém stavu	63
3.10	Měření naprázdno a nakrátko při jmenovitých hodnotách	66
4	Závěr	68
5	Seznam použité literatury	71

Úvod

Elektrická zařízení jsou nedílnou součástí každodenních činností všedního dne každého z nás. Poruchy vzniklé na některých elektrických zařízeních mohou způsobit vážné potíže, jak v elektrizační soustavě, tak v různých výrobních technologických procesech. Pro odstranění těchto nenadálých poruch slouží metody a principy použité v technické diagnostice.

Základní věcí správně fungujícího elektrického zařízení je izolační systém. Porucha v izolačním systému znamená, že elektrické zařízení nebude stoprocentně provádět činnost pro kterou bylo vyrobeno, nebo nebude schopno práce vůbec. Z tohoto důvodu je diagnostika izolačního systému velice důležitá.

Elektrická zařízení jsou vyráběna do různých klimatických podmínek, které mohou působit v průběhu roku. Teplota, relativní vlhkost a elektromagnetické pole působí na izolační systém v každém elektrickém zařízení. Vlastnosti izolačního systému se působením těchto fyzikálních veličin mohou rychle měnit a způsobit nevratné změny. Diplomová práce „Diagnostika izolačního stavu energetického zařízení“ se bude zabývat rozbořem změn v izolačním systému za dlouhodobého působení různých teplot v různých stavech zatížení. Výsledky získané měřením charakteristických hodnot izolačního stavu mohou odhalit chování a schopnost odolat těmto vlivům.

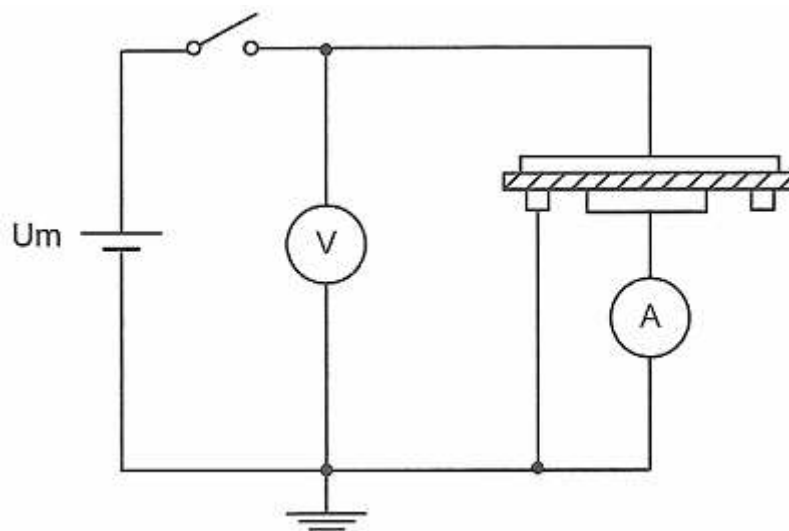
1 Metody diagnostiky izolačního systému

1.1 Absorpční a resorpční charakteristiky

Při rozhodování a vyhodnocování stavu izolačních systému elektrických zařízení je důležité znát jejich parametry. Mezi údaje, které mají dobrou vypovídací hodnotu patří měření absorpčních charakteristik. Jedná se o určení izolačního odporu R_x , polarizačních indexů p_{II} , p_{II0} , dalších parametrů, kterými jsou **redukované resorpční křivky** (RRK) a velikosti ploch pod absorpčními i resorpčními křivkami.[1]

1.1.1 Izolační odpor

Další možný parametr, který lze získat z absorpční a resorpční charakteristiky, je **izolační odpor**. Je to poměr stejnosměrného napětí přivedeného na zkoušený objekt a celkového proudu v definovaném čase p připojení. Pro měření musí být použit stabilní zdroj napětí. Doporučené napěťové hladiny jsou 500, 1000, 2500, 5000, 10 000, 15 000 V. Pokud měřený odpor závisí na polaritě napětí, je nutné to uvést. Nejpoužívanější metoda pro měření odporu je Voltampérová metoda viz.Obr. 1.1.[1]



Obr. 1.1 Voltampérová metoda pro měření odporu [1]

$$R_x = \frac{U}{I} (\Omega; V, A) \quad (1)$$

1.1.2 Polarizační indexy

Velice dobrou vypovídací schopnost mají takzvané **polarizační indexy**. Jsou to bezrozměrná čísla, která využívají pro popis materiálu časovou proměnnost absorpčního proudu. Polarizační indexy jsou nezávislé na rozměrech měřených objektů.

Jednominutový polarizační index p_{i1} je definován jako poměr absorpčních proudů v 15 a 60 sekundě po přiložení napětí na vzorek.

Desetiminutový polarizační index p_{i10} je definován jako poměr proudů v 1 a 10 minutě.

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}} \quad [1](2)$$

kde R_{60}, R_{15} jsou odpory v 60 a 15 sekundě od přiložení napětí (Ω)

i_{15}, i_{60} odpovídají absorpční proudy (A)

i_{∞} vodivostní ustálené proudy (A)

Obecně platí, že má-li diagnostikovaný předmět převažující prosakující vodivostní ustálenou složku i_{∞} , pak čitatel i jmenovatel zlomku se liší jen o velmi málo a p_{i1} je blízký jedné. V tom případě se jedná o předměty s velkým počtem volných nosičů elektrického náboje. Toto nastává u navlhle a znečištěné izolace elektrických zařízení. Na rozdíl od vlhké izolace je vodivostní ustálený proud u suché izolace malý, silně se uplatňuje časově závislá složka i_{abs} a tím je hodnota p_{i1} mnohem větší.[1]

1.1.3 Redukované resorpční křivky

Pomocí resorpčního proudu se dá stanovit další parametr, takzvané **redukované resorpční křivky**. Metoda RRR je založena na matematickém zpracování průběhu naměřených resorpčních proudů. Ty se zpracovávají do tvaru relativních resorpčních charakteristik. Každá hodnota změřená v čase t se vyjadřuje jako poměr k proudu v 15 vteřině. Po transformaci souřadnic podle následujících vztahů získáme redukované resorpční křivky.[1]

$$x = \ln(t) - \ln(15), \quad [1](3)$$

$$y = ABS[\ln(i_t) - \ln(i_{15})], \quad [1](4)$$

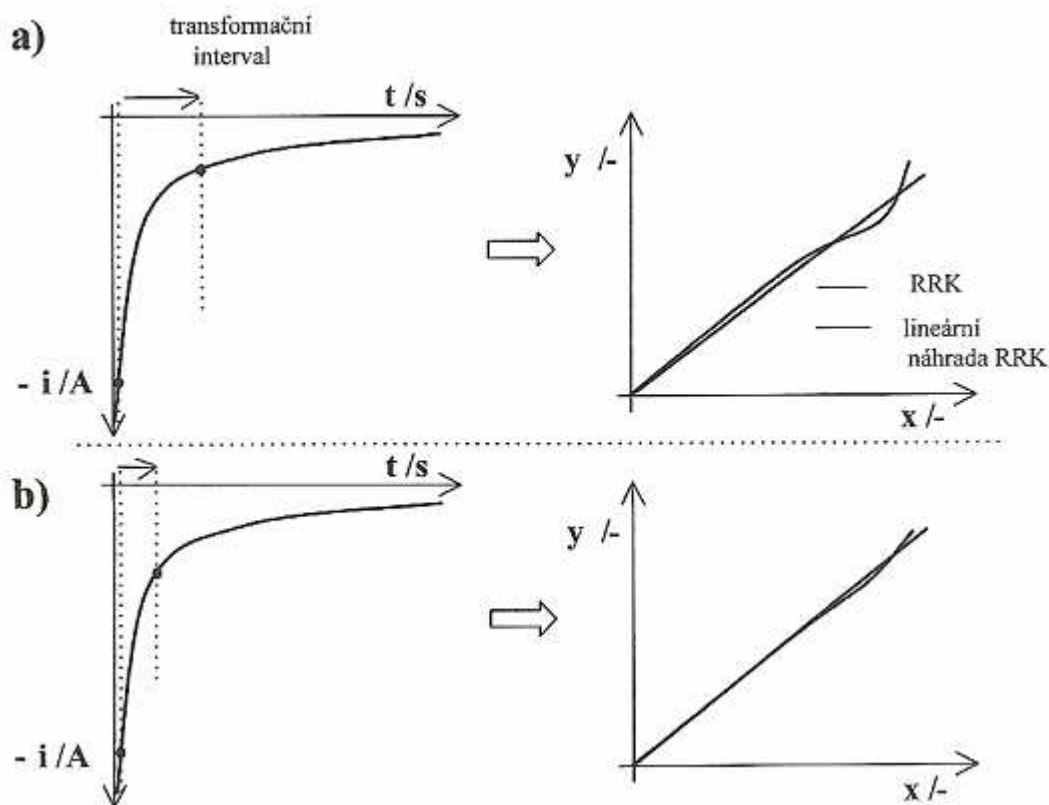
kde x, y transformované souřadnice(-),

t čas (s),

i_t okamžitý proud v čase t (A),

i_{15} proud v patnácté sekundě (A).

Výsledným parametrem pro hodnocení vlastností izolačního systému jsou směrnice jejich lineárních náhrad. Prováděná náhrada se provádí nejčastěji v intervalu 15 až 300 sekund. Dá se říci, že čím je redukovaná resorpční křivka strmější, tedy má větší směrnici, tím má izolant lepší izolační vlastnosti, naopak zmenšující se směrnice vypovídá o horších izolačních vlastnostech.



Obr. 1.2 Vliv šířky pásma transformace na výsledný průběh RRK a jim odpovídající lineární náhrady: a) příliš dlouhý interval, b) optimální volba časových mezí [1]

Při hodnocení stupně zestárnutí za pomoci metody RRK je třeba dbát na správné zvolení časového intervalu jednoho kroku. Jestliže nezvolíme dostatečně krátkou dobu kroku, dojde ke zkreslenému sejmutí resorpční křivky. V takovém případě nelze najít pro transformovanou RRK lineární náhradu s přijatelným koeficientem korelace, stejně jako na Obr. 1.2.

Charakteristické hodnoty pro hodnocení absorpce a resorpce obdržíme také vyjádřením – **integrací – plochy pod absorpční, eventuálně resorpční křivkou.**

Použití analytické metody by v tomto případě bylo možné jen za předpokladu ideálního průběhu sledovaného absorpčního nebo resorpčního proudu (exponenciála). Protože takový předpoklad není akceptovatelný, je zapotřebí aplikace numerické metody, kdy pro aproximaci určitého integrálu se použije kvadrurní vzorec. Známe-li dvě hodnoty proudu v dostatečně krátkém čase, můžeme použít vztah pro výpočet lichoběžníku ABCD, viz. Obr. 1.3. Vzorec pro výpočet plochy pod křivkou:

[1]

$$K(f) = (t_1 - t_2) \cdot [f(t_1) + f(t_2)] / 2 \quad [1](5)$$

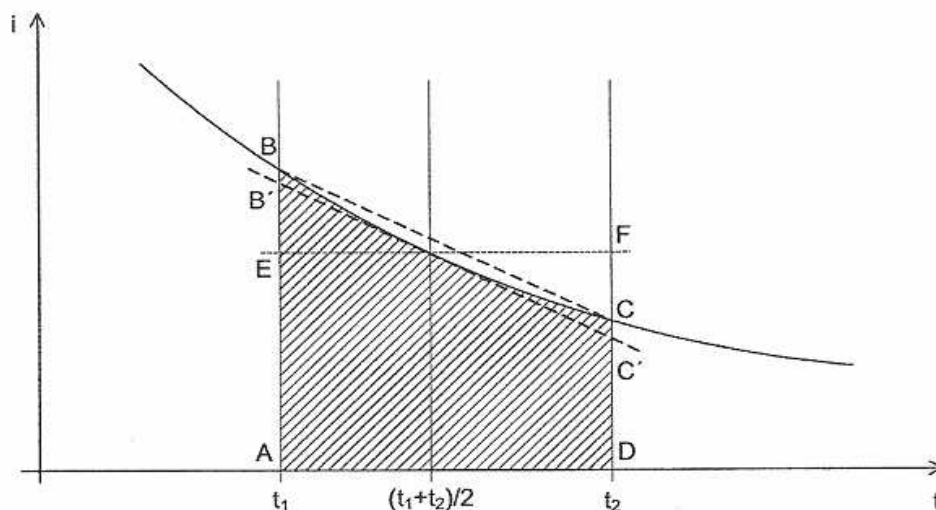
Integrál se dá aproximovat také obsahem lichoběžníku $AB'C'D$, kde $B'C'$ je tečna ke křivce v bodě $t = (t_1 + t_2)/2$. Obsah tohoto lichoběžníku je roven obsahu obdélníku $AEFD$ a příslušný kvadrurní vzorec pro obdélníkové pravidlo je potom

$$K(f) = (t_2 - t_1) \cdot f[(t_1 + t_2)/2]. \quad [1](6)$$

Sečtením obsahů obrazců se přiblížíme velikosti plochy pod křivkou

$$P_{pkř} = \sum_{i=1}^{n-1} K(f_m), \quad [1](7)$$

kde n je počet zaznamenaných měření.



Obr. 1.3 Zobrazení lichoběžníkového pravidla pro vyjádření plochy pod absorpční nebo resorpční křivkou [1]

Je zřejmé, že metoda bude zatížena chybou. V případě malých intervalů $\langle t_1, t_2 \rangle$, kde funkce nevykazuje prudké změny – což je případ průběhů absorpčních a resorpčních proudů – bude chyba nepatrná.[1]

1.2 Vybrané metody měření odporu

Při praktickém sledování vývoje vlastností izolačních systémů točivých strojů je možné použít vyjádření změn odporu dvěma metodami a sice poměrnou odchylkou od Ohmova zákona (signalizující blízkost se nezvratné změny v systému) a dynamickou časovou konstantou (respektující velikost stroje a vývoj odporu sledovaného izolačního systému).[1]

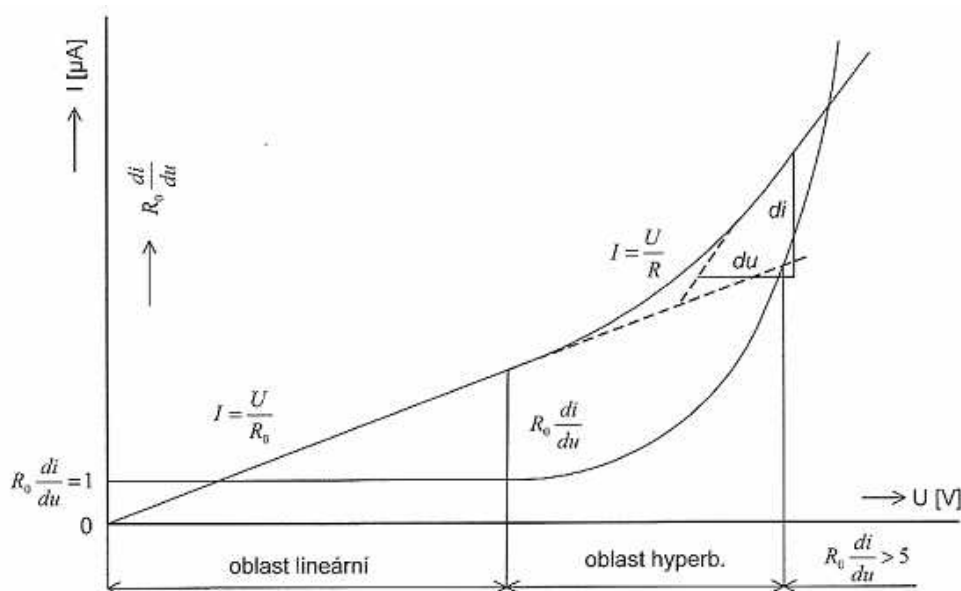
1.2.1 Poměrná odchylka průběhu izolačního proudu od Ohmova zákona

Touto metodou určujeme odchylky průběhu charakteristiky $I_{izol} = f(U)$ od průběhu, který odpovídá Ohmovu zákonu. Základem je určení veličiny η_0 určené jako výše uvedená odchylka zachycená na Obr. 1.4 a určená vztahem:

$$\eta_0 = R_0 \cdot \frac{di}{dU} (-, \Omega, A/V), \quad [1](8)$$

kde R_0 je izolační odpor daného stroje změřený při nižším napětí, di/dU je strmost křivky, která vyjadřuje závislost izolačního odporu v určitém bodě závislosti. V případě, že měřený proud sleduje Ohmův zákon, je tato hodnota rovna jedné. Jakmile se začne izolační proud výrazněji zvětšovat, začne růst i sledovaná veličina η_0 . [1]

Zkušební bylo posouzeno, že dosáhne-li η_0 hodnot 5 až 7, je dosaženo kritické oblasti, v níž lze předpokládat nevratné změny ve struktuře izolace vedoucí k pochodům, které vedou k destrukci izolantu elektrickým průrazem. To je důvod proč je tato veličina uváděna jako orientační a slouží jako signál pro blížící se destrukce izolace. [1]



Obr. 1.4 Znáznornění poměrné odchylky od Ohmova zákona [1]

1.2.2 Dynamická časová konstanta

Dynamická časová konstanta ζ svým charakterem respektuje velikost zkoušeného stroje a nezávisí na počátečním odporu prověřovaného objektu změřeném při nižším napětí. Definice dynamické časové konstanty vyplývá z izolační časové konstanty stroje $R_0 \cdot C$ a odchylky od Ohmova zákona η_o . [1]

$$\zeta = R_0 \cdot \frac{C}{\eta_o} (s, \Omega, F, -) \quad [1](9)$$

Vyjádříme-li odchylku od Ohmova zákona v diferenčním tvaru:

$$\eta_o = R_0 \cdot \frac{\Delta I}{\Delta U} (-, \Omega, A, V) \quad [1](10)$$

Dosazením do předešlé rovnice dostaneme:

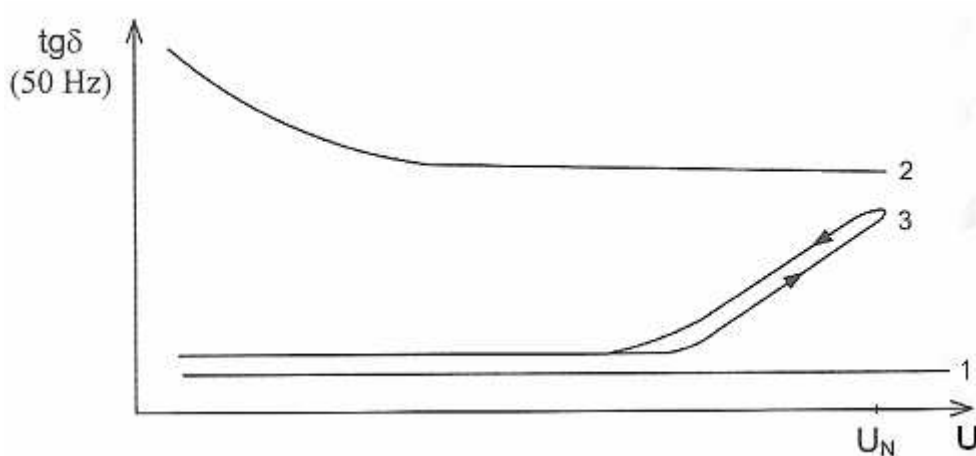
$$\zeta = R_0 \cdot \frac{C}{\left(R_0 \cdot \frac{\Delta I}{\Delta U}\right)} = C \cdot \frac{\Delta U}{\Delta I}, \quad [1](11)$$

kde C kápacita měřeného objektu [F],
 ΔU napěťový interval,
 ΔI difference proudu v napěťovém intervalu ΔU .

Protože použitý vztah $\Delta U/\Delta I$ představuje proměnlivost odporu v určitém úseku, pro ΔU , dosáhneme nejlepších výsledků při maximálním zkušebním napětí. Toto napětí může být dvojnásobek jmenovitého napětí stroje $2U_n$, u proudu pak jde o diferenci mezi předposledním a posledním napěťovým stupněm. Dynamická časová konstanta je dobře použitelná při klasifikování stupně zestárnutí izolace vinutí točivých elektrických strojů. [1]

1.2.3 Ztrátový činitel

Každý izolační systém je ve své podstatě dielektrikum, na které působí stejné síly jako v každém jiném dielektriku vystaveném elektrickému poli. Vlivem polarizace se rozdělí dielektrikum na dva dipóly. Ty to dipóly jsou přitahovány opačným potenciálem elektrod. Působením jakékoli frekvence napětí mezi elektrodami, kde je umístěno dielektrikum, vznikají činné ztráty vlivem tření molekul o sebe, tyto ztráty jsou charakterizovány ztrátovým činitelem $\tan \delta$. Se zvyšující se hodnotou ztrátového činitele se izolace více zahřívá a rychleji stárne. Díky tomu ztrátový činitel poskytuje obraz o celkovém stavu izolace a z jeho velikosti se dá dobře indikovat jestli je izolační systém zestárlý nebo navlhlý. Různé stavy izolačního systému popisuje Obr. 1.5.



Obr. 1.5 Průběhy ztrátového činitele v závislosti na napětí [1]

- 1) kvalitní izolace - nízký ztrátový činitel nezávislý na hodnotě přiloženého zkušební napětí,
- 2) navlhlá izolace – poměrně vysoká a stabilní hodnota ztrát. Pokles ztrátového činitele je způsoben zvýšenou vlhkostí dielektrika, tudíž se činná složka rychle odvádí z izolantu a ionty se soustřeďují na hraniční ploše,
- 3) suchá kvalitní izolace – konstantní průběh až do chvíle aktivace nárůstu částečných výbojů. Na tomto místě je pozorovaná i značná hystereze v důsledku změny poměrů v defektních místech, což je způsobeno vlivem změn výšky zapalovacího a zhasacího napětí.

Dielektrické ztráty jsou nejčastěji měřeny můstkovou metodou při střídavém napětí. Jako osvědčené metody se používá Scheringův můstek s přiloženým napětím 10 kV. Pokud tomuto napětí nevyhovuje izolační hladina měřeného vinutí, použije se nejbližší nižší zkušební napětí z řady 0,5 – 1 – 2 – 5 kV. Pokud je to možné, doporučuje se provádět měření při teplotě stroje 20 °C. Měření ztrátového činitele je značně citlivé na vliv parazitních vazeb s okolím. [1][4]

1.2.4 Měření poměru kapacit C_2/C_{50}

U tohoto měření se vychází ze skutečnosti, že je-li vinutí elektrického zařízení v pořádku, jsou jeho kapacity měřené při různých frekvencích a různých teplotách stejné. Jakmile je vinutí například navlhle, změní se jeho chování do té míry, že se kapacity při frekvenci 2 a 50 Hz nebo při teplotách 80 a 20 °C značně liší. Pro poměr obou kapacit 1,2 při 20 °C.

Přístrojem se stanoví kapacita C vinutí proti kostře, která je totožná a kapacitou C_{50} měřenou při frekvenci 50 Hz, dále se změří rozdíl kapacit $C_2 - C_{50}$ měřených při frekvenci 2 a 50 Hz.[1]

- 1) pro transformátor ponořený v oleji je porovnávána hodnota C_2/C_{50} a vyjadřuje objemové zvlhnutí izolace,
- 2) pro transformátor vyjmutý z oleje hodnota $\Delta C/C$ charakterizuje jeho povrchové zvlhnutí.

1.3 Napěťové zkoušky

Napěťové zkoušky jsou nedílnou součástí při diagnostikování stavu izolačního systému elektroizolačních materiálů a elektrického zařízení. Podávají informaci o nejdůležitějším parametru, elektrické pevnosti zkoumaného objektu.

Elektrická pevnost je hlavním sledovaným parametrem elektrického zařízení, protože její hodnota je určující pro návrh a konstrukci izolačního systému elektrických strojů a zařízení. Podle druhu přiloženého napětí rozeznáváme zkoušky stejnosměrným napětím, zkoušky střídavým napětím a zkoušky impulsním napětím. Blíže bude vysvětlena pouze metoda zkoušky atmosférickým impulsním napětím.[4][1]

1.3.1 Zkouška atmosférickým impulsním napětím

Pro tuto metodu je zapotřebí zdroje, který je schopen zajistit normalizovaný impuls napětí s dobou čela 1,2 μ s a dobou půltýlu 50 μ s. Označuje se jako impuls 1,2/50. Atmosférický impuls nesmí být přerušen průrazným přeskokovým výbojem. Za atmosférický impuls se považuje takový, který má dobu čela do 20 μ s. Impulsy s delší dobou čela se nazývají spínací.[1][4]

Zkouškami elektrické odolnosti se zjišťuje, zda je dostačující elektrická pevnost mezi:

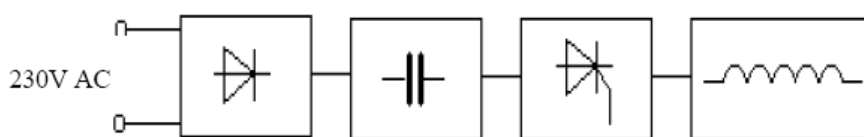
- jednotlivými vinutími navzájem
- vinutím a uzemněnými částmi transformátoru
- závity, vrstvami a cívkami každého vinutí

Zkušební postup závisí na povaze izolačního systému zkušebního objektu. Zkušební objekt může být tvořen obnovující se a neobnovující se izolací. Ve vysokonapěťových přístrojích jsou často kombinace izolace obojího typu. Některé části mohou být při opakovaném nebo trvalém přiložení napětí degradovány a toto chování izolace musí být samozřejmě bráno při testování do úvahy.[1][4]

1.3.2 Impulsní srovnávací zkouška

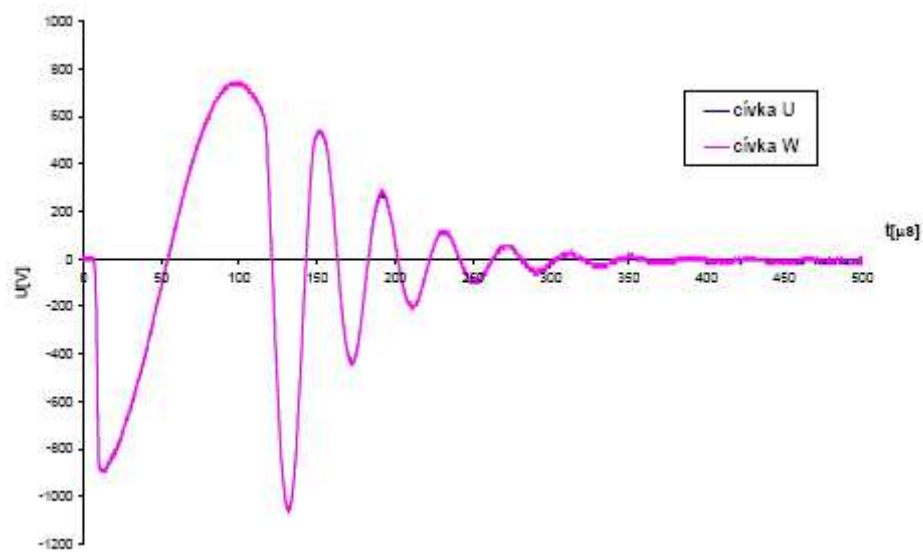
Tato metoda patří mezi nedestruktivní, nezátěžovací metody s dobrou výpovědi schopností. Princip metody spočívá ve vybíjení dvou identických kondenzátorů do dvou vinutí a následného zobrazení rezonančního tlumeného děje.

Průběhy tlumeného rezonančního děje jsou identické jen v případě, že jsou obě vinutí stroje nepoškozená, tedy není-li porušena izolace mezi jednotlivými závity vinutí. V opačném případě dochází k amplitudové, tak i úhlové odchylce. Jelikož strmá vlna má hodnoty až 10 kV, nejsou snímány průběhy přímo na zátěžích, ale jsou snímány pomocí kapacitního děliče paralelně připojeného k zátěži. Blokové schéma testerů je znázorněno na Obr. 1.6. Místo klasického kulového jiskřiště je zde použito tyristorů.

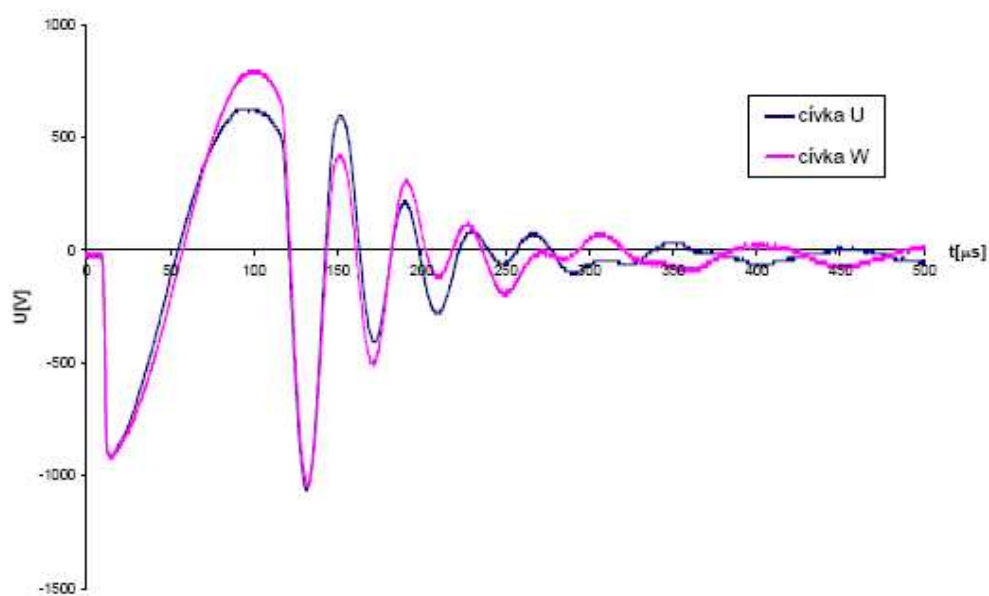


Obr. 1.6 Blokové schéma testerů se strmou vlnou [4]

Protože se jedná o srovnávací zkoušku, není možné zjistit poruchu v případě, že jsou obě vinutí poškozená identicky. Avšak pravděpodobnost, že budou obě vinutí identicky poškozená je zanedbatelná. Výhodou metody je zjištění poruchy už při hodnotě špičkového napětí strmé vlny odpovídající jmenovité hodnotě zařízení. Různé poruchy na vinutí mají různé projevy na křivce. Toto dovoluje použít rozborové postupy, které vyhodnocují jisté změny křivky, což dává možnost rozlišovat různé poruchy a poskytuje hodnotné statistické znalosti výzkumu částečných poruch nebo poruch způsobeným procesem. Jedná se o metody jako např. amplitudové toleranční pásmo, fázový posun kmitů, vyhodnocení pomocí ploch, Fourierova, Waveletová transformace. Ukázka kmitů je na Obr. 1.7 a Obr. 1.8. [4]



Obr. 1.7 Vinutí U, V, W bez poruchy [4]



Obr. 1.8 Vinutí U s poruchou, 8x mezi-závitový zkrat [4]

1.4 Částečné výboje

1.4.1 Rozbor částečných výbojů

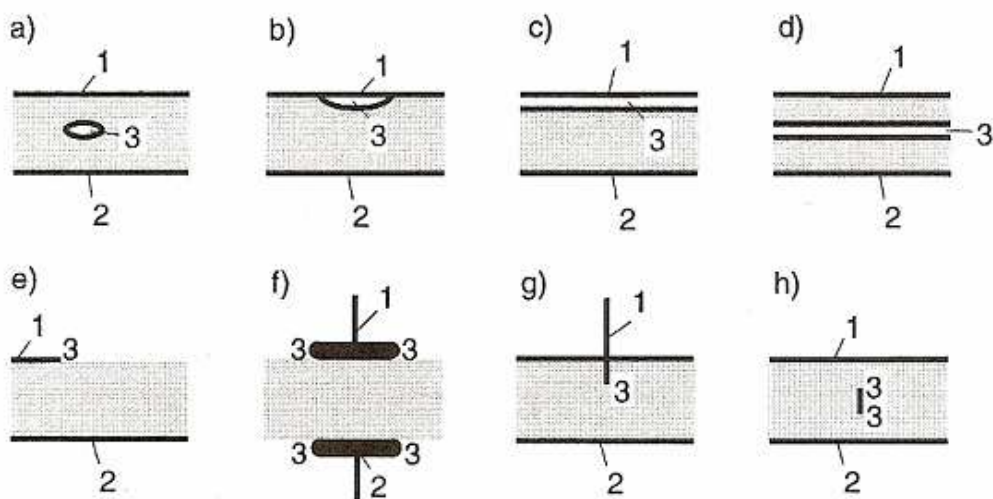
Mezi velice důležité diagnostické signály v diagnostice elektrických strojů je detekce přítomnosti elektrických výbojů v pevném, plynném nebo kapalném dielektriku izolačního systému.

Jedním z druhů elektrického výboje vyskytujícího se při provozu elektrických strojů, zařízení, elektrických vedení apod. jsou částečné výboje. V případě, že se jedná o částečný průraz v plynném izolantu, hovoříme o *částečném výboji*.

Částečné výboje můžeme zhruba rozdělit na vnější, vnitřní a povrchové (klouzavé) částečné výboje. Vnější částečné výboje jsou částečnými výboji v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení, jako jsou například doutnavé výboje, korónové výboje.

Vnitřní částečné výboje jsou částečné výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným izolantem, jako jsou například výboje v plynných dutinkách v pevném izolantu. Povrchové částečné výboje jsou částečné výboje v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného izolantu, například to mohou být klouzavé výboje pevného a plynného izolantu.

Jednotlivé druhy vnitřních a povrchových částečných výbojů lze modelovat na typicky elektrodových uspořádáních znázorněných na Obr. 1.9.



Obr. 1.9 Typická elektrodová uspořádání pro částečné výboje [3]

Číslicemi 1 a 2 jsou označeny elektrody. Pevný izolant, obsahující plynnou dutinku (například dutinku, která vznikla při lití epoxidové izolace či při tvarování polyetylenového izolantu) je případ A. Povrchová dutinka, která vznikla odtržením izolace od elektrody je případ B. Mezera mezi elektrodou a pevným izolantem (takzvaná delaminace izolace) jsou na obrázcích C, D. Typické případy, kdy se částečné výboje objevují na hranách elektrod, rovnoběžné s povrchem pevného izolantu (tedy klouzavé výboje) jsou obrázky E, F. Obrázky G, H uvádějí dva typy uspořádání jehlové elektrody v pevném, popřípadě kapalném izolantu, která jsou svým lokálním zvýšením intenzity elektrického pole, též zdrojem částečných výbojů.[3]

Pro vyhodnocování rozvoje výbojové činnosti a rizika havárie při dalším provozu vysokonapěťového elektrického zařízení je vhodné sledovat vývoj výbojové činnosti v závislosti na čase, porovnávat aktuální naměřené hodnoty diagnostických parametrů s hodnotami z minulých měření popřípadě s hodnotami naměřenými na stejných nebo podobných strojích.[3]

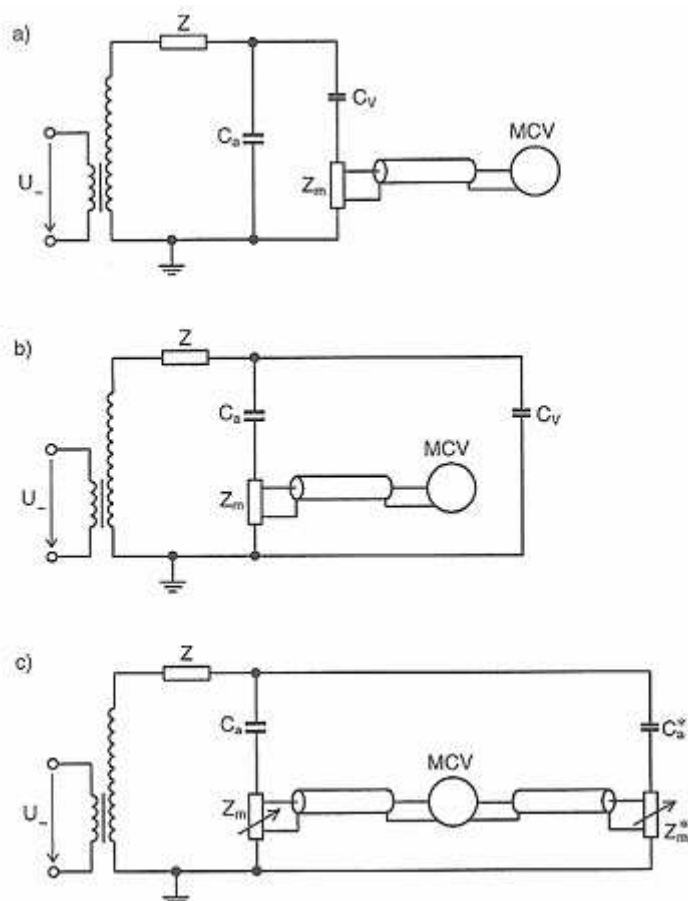
Měření diagnostických parametrů probíhá ve stavu off-line. Při výskytu velkých nárůstů nebo skoků na křivkách nebo při velkých hodnotách diagnostických parametrů lze konstatovat výskyt částečných výbojů v izolačním systému. Naměřené napěťové závislosti diagnostických parametrů se dále porovnávají se závislostmi z předcházejících měření a při změně průběhu křivek se konstatuje změna stavu izolačního systému. [3]

1.4.2 Galvanická metoda měření částečných výbojů

Galvanická metoda měření částečných výbojů je jednou z nejmodernějších metod na sledování stavu izolačních systémů. Tato metoda patří ke globálním metodám měření částečných výbojů. Princip metody je založen na přímém snímání proudových impulsů částečných výbojů.

Superponované impulsy částečných výbojů na napájecím napětí, musí být od tohoto napájení vhodně odděleny. K tomu slouží snímací impedance, která obsahuje, kromě odporu řádu 100 Ω , i tlumivku. U většiny případů je měřicí impedance řešena členem RLC , který je nastaven na nízkofrekvenční propust, jsou k němu paralelně připojeny ochranné prvky (například bleskojistky). Přenos signálu je proveden koaxiálním kabelem se stíněním.

Existují tři základní zapojení pro měření částečných výbojů. Jsou schematicky zobrazena na Obr. 1.10..[3]



Obr. 1.10 Základní zapojení pro měření částečných výbojů galvanickou metodou [3]

Impedance Z se někdy v měřících obvodech používá k zamezení průchodu impulsů, vyvolaných výboji ve zdroji vysokého napětí, a ke snížení rušivého vlivu zdroje [3].

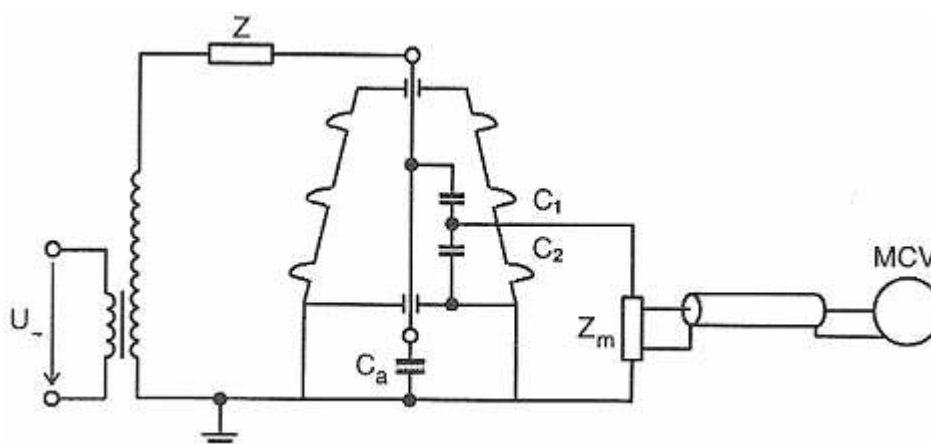
Velmi důležitým prvkem měřícího obvodu je kondenzátor C_v , který musí být navržen pro plné testovací napětí, nesmí mít vlastní částečné výboje a musí mít malou indukčnost. Pro dosažení co možná největší citlivosti měření, by měla být jeho kapacita co největší v porovnání s rozptylovou kapacitou měřícího obvodu. Příliš malá kapacita může zeslabit impulsy částečných výbojů tak, že budou překryty vnějším rušením.[3]

Nejčastějším zapojením měřícího obvodu je obvod a). Pulsy částečných výbojů z měřeného objektu C_a se tak dostávají na měřicí impedanci Z_m přes vazební kondenzátor C_v . Výhodou tohoto zapojení je možnost měření uzemněného objektu. Toto měření je též vhodné v případě velkých kapacit měřených objektů.[3]

Obvod se zapojením měřicí impedance do větve měřeného objektu (Obr. b) se používá pro možnost odtemnit měřený objekt. Je-li rozptylová kapacita obvodu k zemi větší než kapacita měřeného objektu, může být vazební kapacita vynechána.[3]

Můstkové zapojení (Obr. c) pro diferenční snímání proudových impulsů částečných výbojů umožňuje potlačit vliv vnějšího rušení, a proto se s výhodou používá při měření za provozních podmínek. Místo vazebního kondenzátoru C_a^* lze použít zvláštní kondenzátor s kapacitou blízkou kapacitě měřeného objektu nebo druhý měřený objekt se známou hladinou částečných výbojů. Měřicí impedance Z_m a Z_m^* jsou nastavitelné.[3]

Pro měření částečných výbojů na transformátorech s vyvedeným měřícím bodem na kondenzátorových průchodkách se používá speciální měřící obvod viz.Obr. 1.11. U takového měření se využívá vlastní kapacita průchodky. Obvykle je kapacita C_2 mezi měřícím místem a uzemněnou nádobou relativně velká, což může zmenšovat citlivost měření.[3]



Obr. 1.11 Zapojení pro měření částečných výbojů na kondenzátorové průchodce [3]

Výhody galvanické metody měření částečných výbojů:

- Vysoká citlivost měření: díky této metodě se dá měřit výbojovou činností na různých vysokonapěťových zařízeních, zároveň se dá nastavovat citlivost pomocí velikosti vazební kapacity
- Dostatečná vypovídací schopnost metody
- Malé namáhání izolačního systému v průběhu měření: při měření v režimu on-line je každá součást izolačního systému na svém pracovním potenciálu, takže nedochází k žádnému zvýšenému zatěžování
- Možnost použití metody v režimu on-line

Nevýhody galvanické metody měření částečných výbojů:

- Pořizovací a provozní náklady
- Citlivost na rušení: často se v provozu vyskytují různé zdroje rušení. Může se jednat o samotnou síť ale i elektromagnetické vlny rádiových vysílačů, rušivé proudy v uzemňovací soustavě měřiče částečných výbojů
- Potřeba odstavení měřeného objektu z provozu: v případě velkého provozu rušení se může měření provádět pouze na zkoušeném zařízení odpojeném od distribuční sítě

1.5 Přehled diagnostických metod

Tabulka 1.1 Přehled diagnostických metod [3]

Porovnání diagnostických metod 1- nejvyšší 5- nejnižší	Přerušeni provozu	Ohrožení vinutí	Výpovědi- schopnost
ZKOUŠKY ZVÝŠENÝM NAPĚTÍM			
Výdržná zkouška – 50 Hz	2	3	3
ss napětí	2	3	4
0,1 Hz	2	3	2 – 3
půlvlna napětí	2	2	2 – 3
impulsy	2	2	2
Průrazná zkouška	4	5	2
STEJNOSMĚRNÁ MĚŘENÍ			
Izolační odpor	2	1	4
Polarizační index	2	1	4
Polarizace/depolarizace = $f(t)$	2	1	2 – 4
Polarizace v 100 % rel. vlhkosti	5	1	1 – 3
MŮSTKOVÁ MĚŘENÍ			
Změna $\tan \delta$, změna C	2	2	3
Analyzátor dielektrických ztrát	2	2	2 – 3
RC (izolační časová konstanta)	2	2	2 – 3
PULSNÍ A VF MĚŘENÍ			
Detektor částečných výbojů	2	2	2
Analýza signálů v nulovém vodiči	2*	2	1 – 3
Drážková sonda manuální	4	2	2
Drážková sonda automatická	2*	1	2
Impulsní analýza částečných výbojů	1*	1	1
MECHANICKÉ A AKUSTICKÉ TESTY			
Rázové impulsy (ložiska)	1*	1	1
Ultrazvuk (lokalizace částečných výbojů)	2*	2	2 – 3
Akustická emise	1*	2?	2?
TEPELNÉ A CHEMICKÉ TESTY			
Teplota	1*	1	1 – 4
Plyny z přehřáté izolace	2*	1	2
Plyny z návěstidel	1*	1	1
SMYSLOVÁ KONTROLA	2 - 4		
Test částečných výbojů ve tmě			
Ochrana proti koróně: drážky, čela			
Stav izolace: drážky, čela			
Klínování, upevnění, spoje			
Statorové plechy			

* Trvale umístěné snímače

2 Izolační systém elektrických strojů

Za konec funkční schopnosti izolačního systému je možno považovat okamžik, kdy hodnota průrazného napětí libovolného elementu klesne pod hodnotu napětí, které je na něj přiloženo při provozu. Stárnutí izolačních systémů probíhá převážně vlivem teploty a mechanického namáhání za přítomnosti elektrického pole a dalších činitelů. Podle druhu poruchy se dá rozlišit:

- závitový zkrat,
- zkrat na kostru,
- zkrat mezi fázemi,
- tepelné znehodnocení,

Pravděpodobnost průrazu izolačního systému závisí na homogenitě izolačního systému, počtu slabých míst, velikosti styčných ploch závitů, na styku vodičů s různým potenciálem.

Stav izolačního systému je základní hledisko každého elektrického zařízení při vyhodnocování jeho aktuálního stavu. Izolačním systémem se rozumí galvanické oddělení jednotlivých komponent elektrického zařízení, u kterých v žádném případě nesmí dojít k vodivému spojení. Galvanického oddělení se dosáhne použitím vhodného izolantu. Jako jeden z nejzákladnějších izolantů se používá impregnační lak, kon. papír. Většinou jako druhého izolačního prvku u elektrických zařízení se používá SF₆, vzduch, transf. olej. U venkovního vedení to jsou talířové izolátory.

- Izolanty mohou být:
- Plynné (vzduch, SF₆)
- Kapalné (transf. olej, laky)
- Pevné (kon. papír, keramické izolátory)

2.1 Izolační systémy transformátorů

Izolační systémy transformátorů se dělí na:

- 1) Suché transformátory
- 2) Zalévané transformátory
- 3) Olejové transformátory

- 1) U suchých transformátorů se jako primární základní izolace používá papír impregnovaný polyesterovými laky, aramidový papír, lepenka, skleněná tkanina, polyamidy. Jako chladiivo a zároveň izolační systém je použito FS6, vzduch. Vyrábějí se do 38 kV a 10 MVA.
- 2) Tyto transf. jsou mezikrokem suchých a olejových transf. Jako základního izolačního systému je použití skleněné tkaniny. Transformátor je zalit epoxidovou pryskyřicí, případně pryskyřicí na bázi alifatických glycidyleterů. Vyrábějí se do 38 kV a 35 MVA.
- 3) Jsou to nejrozšířenější transf. Jako chladiiva a zároveň izolačního materiálu je použit většinou minerální olej. Impregnuje se primární vinutí někdy i sekundární. Dále použitými izolačními materiály jsou tvrzený papír, skelný laminát. Místo minerálního oleje může být použito silikonových olejů, polybutylenů, fluorovaných sloučenin.

2.2 Izolační systémy nízkonapětových točivých strojů

Izolační systém točivých strojů se skládá z izolace vodičů, drážkovou izolací a impregnantem. Impregnace vinutí se provádí máčením, vakuovou tlakovou impregnací a zakapáváním. Použité laky jsou vyrobeny z polyesterů a polyesterimidů. Izolační materiál použitý v drážkách je kombinace lepenky, aramidového papíru s polyetylentereftalátovou fólií. Vodiče jsou většinou izolovány opředěním nebo ovinutím bavlnou, skleněnými vlákny.

2.3 Izolační systém vysokonapětových točivých strojů

Izolační systémy vysokonapětových strojů se dělí na dva způsoby:

- 1) Prvním způsobem je systém resin-rich.
- 2) Druhá možnost je vakuově tlaková impregnace.

- 1) Tento izolační systém je tvořen před impregnovaným materiálem s 30 ÷ 40 procenty pojiva. Pomocí tohoto zpracování se vytvoří okolo vodivého materiálu (vinutí stroje) izolační trubka, poté se vinutí může umístit do drážek. V případě drážek tvoří nosnou část skleněná tkanina tloušťky 0,12 ÷ 0,14 mm, dále kalcinovaný slídový papír. Jako pojivo je použito reaktoplastická bezrozpuštědlová epoxidová pryskyřice. Materiál se musí přetvrdit.
- 2) Způsob VPI se používá nejčastěji u trakčních motorů, kde je potřeba impregnační systém zpevňující vinutí při výborných izolačních a teplotních vlastnostech. Základem je savá slídová páska, která je prosycena impregnantem. Opět je jako nosná část použita skleněná tkanina nebo polyesterové rouno. Druhá komponenta je nekalcinovaná slída ve formě slídového papíru. Zde je použito pojiva jen do 7 procent, z důvodu mechanického zajištění pásy. Jako impregnantu je použito bezrozpuštědlové epoxidové, polyesterové nebo silikonové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny.

2.4 Tepelné stárnutí a určení tepelné odolnosti

Posuzování odolnosti většiny elektrických zařízení závisí také na tepelné odolnosti izolačního systému, který většinou tvoří nejslabší článek z hlediska spolehlivosti celého zařízení. Na elektrická zařízení je třeba pohlížet jako na sériový spolehlivostní řetězec.

Zařazení izolačního systému do určité třídy tepelné odolnosti může být provedeno jen podle výsledků zkoušek zrychleného stárnutí. Souvislost mezi délkou experimentu, tedy životností izolace τ (h) a teplotou T (°C), při které izolace stárne, vychází z empirického Montsingerova pravidla:

$$\tau = A \cdot e^{-BT} \quad [1](12)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty, které musí být určeny experimentálně.

Dobu života jde určit i z Arrheniovy rovnice:

$$\tau = a \cdot e^{\frac{W_a}{RT}} \quad [1](13)$$

kde W_a je aktivační energie procesu (eV),

R je univerzální plynová konstanta,

a je konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul,

T je absolutní teplota (°C)

[1][2]

Životnost materiálu je tedy exponenciální funkcí teploty stárnutí, to znamená se zvýšením teploty se exponenciálně zkracuje délka života izolačního systému.

Tabulka 2.1 Přehled tepelných tříd pro izolační materiály [1]

Třída	70	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
Teplotní hranice	70 °C	90 °C	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C	200 °C	220 °C	250 °C

Zkoušky, které se pro hodnocení materiálů vzhledem k určení jejich tepelné odolnosti používají, napodobují provozní podmínky ve zjednodušeném uspořádání. Patří sem urychlené tepelné stárnutí umožňující určení křivek odolnosti tepelnému namáhání a z nich vyhodnocených teplotních indexů (TI) a dalších parametrů.[1]

2.5 Elektrické modely stárnutí

Aby bylo možné navrhovat izolační systémy s definovanou mírou spolehlivosti vzhledem k namáhání, jakému bude v čase požadované provozuschopnosti odolávat, je třeba co nejlepšího pochopení dějů, k jakým bude během jeho deteriorace docházet.

Zahrnout do modelu stárnutí všechny deteriorační faktory působící na izolační systém je velice obtížné a určitě ne zcela možné. Mezi působící faktory se dá zahrnout kromě elektrického namáhání i mechanické, tepelné a biologické faktory.

Přesný mechanismus působení elektrického pole na stárnutí materiálu je znám jen velmi málo. Dá se říci, že většina poznatků je empirického charakteru.

Pro modelování vlivu elektrického pole na dobu života materiálu jsou používány následující modely:

$$\tau = k \cdot E^{-n} \quad [1](14)$$

Exponenciální model:

$$\tau = a \cdot e^{-bE} \quad [1](15)$$

kde τ je doba života (h),

E je intenzita elektrického pole ($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$),

a , k , n , b jsou konstanty, které je třeba určit empiricky.

[1]

Uvedené modely popisují stárnutí v jakémkoliv materiálu, který je vystaven působení elektrického pole. Je však velice důležité znát pro tyto modely všechny procesy, které elektrické pole v materiálu indukuje.

Tyto modely poskytují poměrně dobré výsledky o době stárnutí izolačního systému v oblastech vyšší intenzity elektrického pole, avšak selhávají při nižších hladinách intenzity elektrického pole. Jak mocninný tak exponenciální model lze použít pro výpočet životnosti při pulsním namáhání.

Mezi používané vícefaktorové modely stárnutí izolace patří:

- Simoniho model
- Ramuův model
- Falloův model
- Crineův model

Simoniho, Ramuův a Falloův model mají víceméně empirický charakter. Oba vycházejí z termodynamiky a je třeba u každého nejprve určit materiálové konstanty. Crineův model už je plnohodnotným fyzikálním modelem, kde všechny parametry mají svůj fyzikální význam.

V současné době již existují softwary na výpočet předpokládaných slabých míst v izolačním systému, což ovšem vyžaduje vysoce výkonný počítač. Izolační systém je velice komplikovaný, je tedy poměrně složité vypočítat a určit jeho slabá místa a vývoj v dalším čase.

3 Analýza izolačního systému elektrického zařízení v různých klimatických podmínkách

3.1 Popis elektrického zařízení

Měření bude prováděno na asynchronním motoru 1,1 kW 1LA7096-6AA10-Z. Jedná se o asynchronní motory určené k pohonu průmyslových zařízení, např. ventilátorů, čerpadel, obráběcích strojů apod. Obr. 3.1.



Obr. 3.1 1,1 kW 1LA7-966A10-Z [5]

Motor 1LA7 je trojfázový motor s rotorem nakrátko, jmenovitá hodnota synchronních otáček je 1000/min. Z těchto údajů vyplývá, že jde o 6 pólový stroj. Základní provedení zahrnuje:

- motor je v hliníkové kostře se svorkovnicí nahoře, s jedním válcovým koncem hřídele v přírubovém provedení
- krytí IP 55
- vlastní povrchové chlazení
- pro trvalé zatížení S1
- pro jmenovitá napětí do 3 kV, 230V Δ /400VY, 50 Hz
- pro teplotu okolí od -30°C do $+40^{\circ}\text{C}$
- s izolačním systémem teplotní třídy izolace F s oteplením ve třídě B
- pro nadmořskou výšku do 1000 m
- s vnějším nátěrem

[5]

Pro izolaci vinutí motoru je použito vysoce kvalitního laku, společně s plošnými izolačními materiály ve spojení s bezrozpouštědlovou pryskyřičnou impregnací. Výrobce garantuje vysokou mechanickou, elektrickou pevnost, tím i dlouhodobou životnost motorů. Izolace chrání vinutí před vlivem agresivních plynů, par, prachu, oleje, zvýšenou vlhkostí vzduchu a odolává běžnému namáhání vyvolaného vibracemi. Pro simulaci zatížení motoru je motor vybaven pružinovou brzdou typ: 2LM 8020-4NA10.

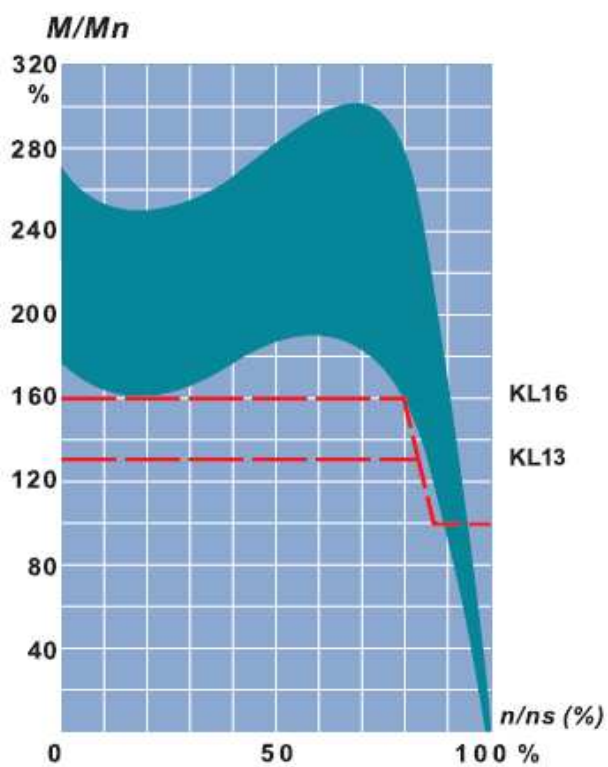
Tabulka 3.1 Technická data zkoušeného motoru

Jmenovitý výkon	Velikost	Označení	Otáčky	Účinnost	Účinník	Jmenovitý proud	Jmenovitý moment
P		6-pól, 1000 min ⁻¹ , 50Hz	min ⁻¹	η	$\cos \varphi$	I	M
(kW)				(%)	(-)	(A)	(Nm)
1,1	90L	1LA 0966AA-Z	915	72	0,77	2,95	11,5

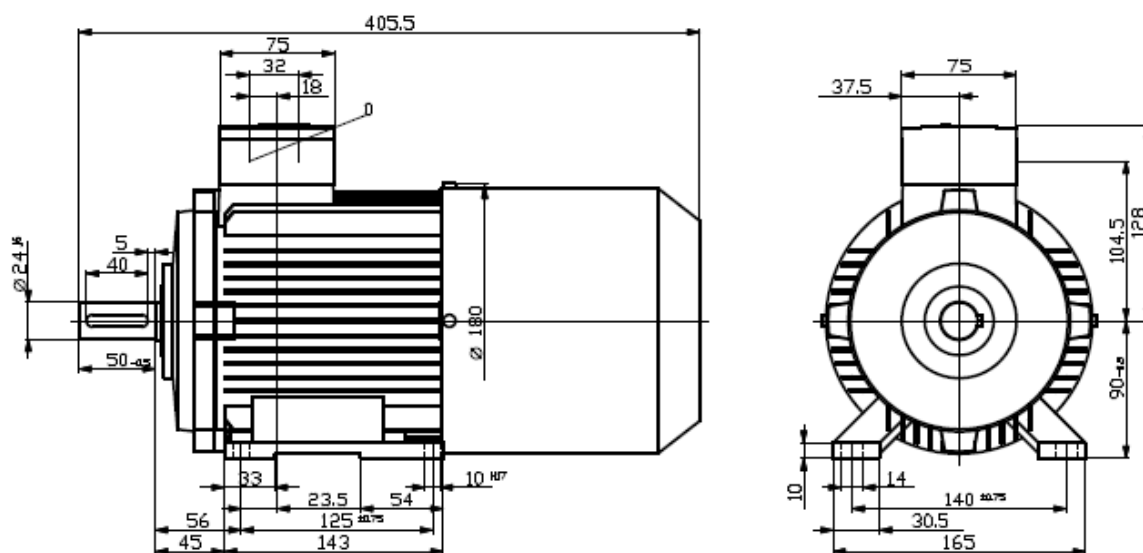
Tabulka 3.2 Technická data zkoušeného motoru

Poměrný záběrný moment	Poměrný záběrný proud I_K/I_n	Poměrný moment zvratu M_{max}/M_n	Momentová třída
M_Z/M_n	I_K/I_n	M_{max}/M_n	KL
(-)	(-)	(-)	
2,3	3,8	2,4	

Na Obr. 3.2 je uvedena momentová charakteristika asynchronního motoru 1LA7. Na charakteristice jsou vyznačeny meze, ve kterých se může pohybovat pracovní bod motoru. Na Obr. 3.3 je zobrazen konstrukční plán asynchronního motoru.



Obr. 3.2 Momentová charakteristika [5]



Obr. 3.3 Konstrukční plán asynchronního motoru [5]

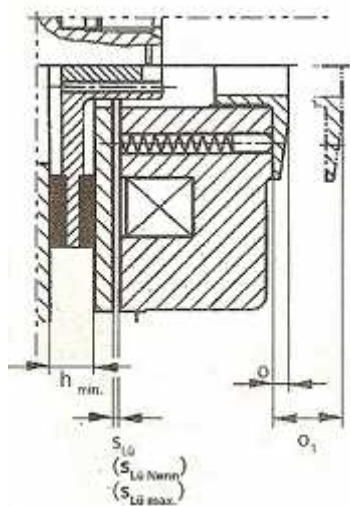
3.1.1 Pružinová brzda 2LM8 020-4NA10

Pružinová brzda slouží k brzdění břemen s velkým momentem setrvačnosti připevněných na hřídeli motoru. Tyto brzdy se používají pro trojfázové asynchronní motory osových výšek 63 – 225L. Brzda nesmí být provozována v prostředí s nebezpečím výbuchu nebo agresivním prostředím. Při vysoké vlhkosti vzduchu a nízkých teplotách musejí být přijata vhodná opatření proti přimrznutí kotouče kotvy a rotoru. Brzda je dimenzovaná do teploty okolí -20 °C až 40 °C.

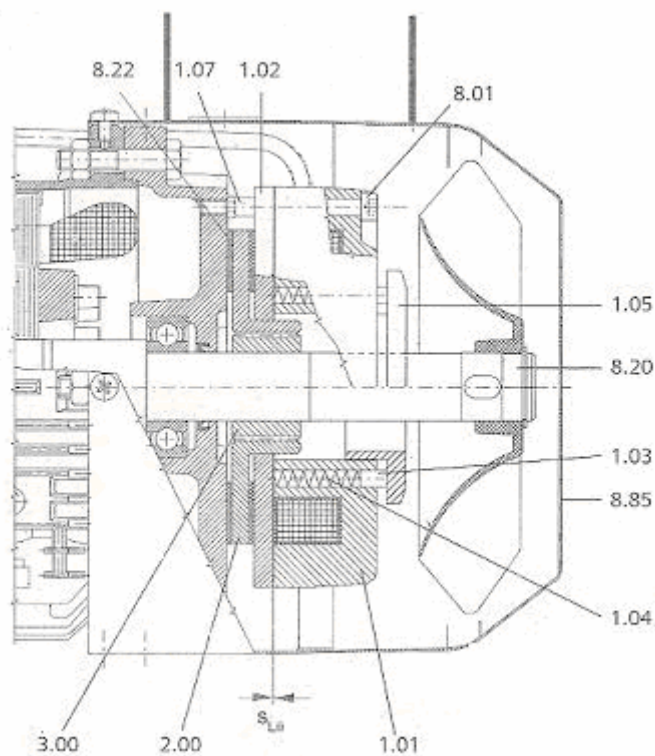
Jedná se o jednokotoučovou brzdu se dvěma třecími plochami. Několik tlačných pružin vyvíjí v bezporuchovém stavu třením brzdný moment. Uvolnění brzdy je prováděno elektromagneticky. Odbrzdění je provedeno elektromagneticky pomocí cívky napájené z usměrňovače. Cívka magnetu se vybudí stejnosměrným napětím. Cívka přitáhne kotvu, tato síla působí proti síle pružin.

Díky samostatnému buzení magnetu je možné odbrzdit brzdu v klidovém stavu motoru. Změna brzdného momentu se nastavuje pomocí nastavovacího kroužku. Každé zapadnutí nastavovacího kroužku znamená změnu brzdného momentu Obr. 3.4.

Protože brzda má za úkol simulovat zátěž, a tím zvýšit statorový proud na hodnotu blízkou jmenovitému proudu, je brzdný moment nastaven na minimální hodnotu. Tato hodnota odpovídá 18,2 N.m.



Obr. 3.4 Změna brzdného momentu [6]



Obr. 3.5 Konstrukční uspořádání pružinové brzdy 2LM8 020 [6]

- 1.01 Magnetová část
- 1.02 Kotouč kotvy
- 1.03 Svěrka
- 1.04 Tlačná pružina
- 1.05 Nastavovací kroužek
- 1.07 Pouzdro
- 2.00 Rotor
- 3.00 Náboj
- 8.01 Pružinová brzda
- 8.20 Prodloužení hřídele
- 8.22 Protilehlá třecí plocha
- 8.85 Kryt ventilátoru

3.2 Popis klimatické komory

Klimatická komora je zařízení pro simulování různých klimatických podmínek a to i v provozních stavech měřených elektrických zařízení. Funkce klimatické komory spočívá v chlazení nebo oteplování vzduchu v prostoru klimatické komory. Ochlazování je provedeno pomocí kompresoru, který stlačuje médium a odvádí z něho teplo pomocí chladiče do okolí a následně vypustí do chladicí spirály. Funkce chlazení pracuje obdobně jako lednice. Kromě kompresorového chlazení je v klimatické komoře nainstalována klimatizační jednotka pro podporu chlazení.

Oteplování je prováděno pomocí topné spirály o výkonu 500 W. Uvolněné teplo z topné spirály je vháněno ventilátorem do prostoru měřeného elektrického zařízení.

Klimatická komora je automatická, hlídání teplotních stavů snímá čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti v klimatické komoře. Automatické řízení klimatické komory zajišťuje kontrolní panel. Izolační vrstva použitá ve stěnách klimatické komory je pěnový polyuretan.

Tabulka 3.3 Rozměry klimatické komory

	Délka	Šířka	Výška
	(m)	(m)	(m)
Vnější rozměry	3	0,8	0,7
Vnitřní rozměry	2,5	0,6	0,5

Tabulka 3.4 Teplotní rozsah klimatické komory

	t (°C)
Maximální simulační teplota	60
Minimální simulační teplota	-30

Nastavitelné funkce řídicího panelu:

- Teplota,
- ruční odmrazování,
- čas kdy se má komora začít odmrazovat,
- doba odmrazování,
- test klimatické komory.

Tabulka 3.5 Popis stránek řízení

<p>Stránka č. 1 aktuálních hodnot</p> <div data-bbox="204 300 580 416"> <p>TEP: ##### VLH: #####</p> </div>	<p>##### - aktuální teplota v °C ##### - aktuální relativní vlhkost % ##### - stav zařízení, ve kterém se aktuálně nachází TOPENI – aktuálně probíhá topení CHLAZ. – aktuálně probíhá chlazení ----- - není zapnuto topení ani chlazení</p>
<p>Stránka č. 2 ovládání topení a chlazení</p> <div data-bbox="204 707 580 837"> <p>TOPENI: ### CHLAZ.: ###</p> </div>	<p>### - tl. 1 – zapnutí, tl. 2 – vypnutí topení ### - tl. 3 – zapnutí, tl. 4 – vypnutí chlazení</p>
<p>Stránka č. 3 ovládání odmrazování a test</p> <div data-bbox="204 954 580 1084"> <p>ODMRAZ.: ### TEST : ###</p> </div>	<p>### - tl. 1 – AUTO, tl. 2 – RUCNE Odmrazování v automatickém režimu (po zadané době zapne odmrazování po nastavenou dobu). Odmrazování v ručním režimu (okamžitě zapne odmrazování po nastavenou dobu) ### - tl. 3 – zapnutí, tl. 4 – vypnutí TEST</p>
<p>Stránka č. 4 nastavení teploty topení a chlazení</p> <div data-bbox="204 1301 580 1386"> <p>TZ: ### CHZ: ### C</p> </div>	<p>### - nastavení žádané hodnoty topení ### - nastavení žádané hodnoty chlazení</p> <p>Pro opuštění této stránky je nutné provést vždy zadání hodnot!!!</p>
<p>Stránka č. 5 nastavení času odmrazování</p> <div data-bbox="204 1592 580 1722"> <p>ODMT 1: ### H:M ODMT 2: ### M:S</p> </div>	<p>### - doba hod:min za jak dlouho se má provést odmrazování ### - doba min:sek jak dlouho bude probíhat odmrazování</p> <p>Pro opuštění této stránky je nutné provést vždy zadání hodnot!!!</p>

3.3 Měření a zpracování dat

Cílem měření je zjistit jak se bude vyvíjet stav izolačního systému v hraničních klimatických podmínkách, pro které byl stroj navržen. Zásadní klimatickou změnou bude teplota okolí a relativní vlhkost. Izolační systém zkoušeného objektu je ve třídě izolace F s třídou oteplení B. Asynchronní motor má krytí IP 55 a jeho použití je při teplotách od -30 °C do 40 °C. Provozní stav asynchronního motoru je charakterizován třemi základními stavy:

- naprázdno
- při hodnotách blízké jmenovitému zatížení
- nakrátko

Stavem nakrátko se v tomto případě myslí stav, kdy hřídel rotoru je mechanicky zablokována. Tento způsob měření je však technicky velmi náročný, proto přichází v úvahu pouze měřené stavy naprázdno a při hodnotách blízkých jmenovitému zatížení. Dále tedy budou uvažovány stavy pouze:

- naprázdno
- při hodnotách blízkých jmenovitému zatížení

3.3.1 Návrh doby a způsobu měření

Měřený asynchronní motor je umístěn do klimatické komory. Do ní je zaveden silový napájecí kabel motoru. Motor je napevno spojen s podstavcem tvořeným dřevěnými hranoly. Uložen je do klimatické komory a zajištěn proti posunu. Společně s napájecím kabelem je do klimatické komory přivedena sonda pro měření *zdánlivého izolačního odporu, polarizačního indexu, absorpčního činitele DAR, kapacity*. Do klimatické komory je zavedena sonda pro měření mezi-závitových zkratů pomocí impulsní srovnávací zkoušky.

Předpokládaná doba provozu motoru v hraničních klimatických podmínkách je 250 hodin:

Tabulka 3.6 - Časové rozvržení testu motoru v různých klimatických podmínkách

stav	Počet hodin v provozu
	(hod)
naprázdno (-20 °C)	80
naprázdno (20 °C)	80
naprázdno (40 °C)	80
zatížen (30 °C)	10
Celkem	250

3.3.2 Sledované parametry měření

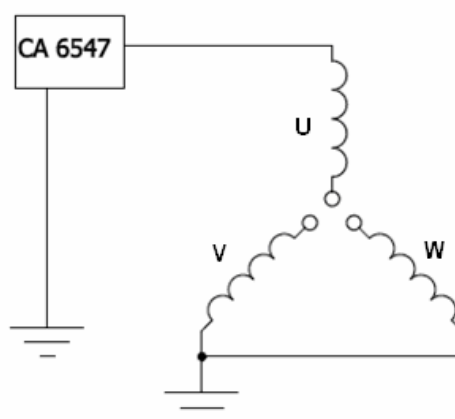
Pro komplexní zjištění stavu izolačního systému jsou měřeny tyto parametry:

- Izolační odpor statorového vinutí
- Izolační odpor celého stroje vůči zemi
- Koeficient dielektrické absorpce
- Polarizační index ρ_{10}
- Kapacita
- Test vybíjení dielektrika
- Impulsní srovnávací zkouška (mezi-závitová izolace)

Výše uvedené parametry kromě Impulsní srovnávací zkoušky jsou měřeny přístrojem Megohmmetrem CA 6547, který má sériové rozhraní RS 232. Velikost zkušebního napětí vyplývá z tabulky dle ČSN 35 0000, kde:

Izolační odpor:

Je měřen CA 6547 zkušebním napětím 500 V_{ss}. Hodnota izolačního odporu se zaznamenává do paměti. Interval měření izolačního odporu ve stavu naprázdno je 20 hodin. Interval měření izolačního odporu při zatížení je 4 hodiny. Při měření izolačních odporu jednotlivých statorových vinutí proti zemi je třeba primární vývody neměřených fází vodivě spojit s klostrou. Na primární vývod měřené fáze se zapojí záporná potenciálová svorka, sekundární vývody každé fáze zůstanou izolovány. Měření se provede ve všech třech fázích samostatně. Na kladný pól zkušebního zdroje se připojí kostra stroje vodivě spojená se zemí a s ostatními vinutími viz. Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Schéma zapojení vinutí motoru při měření

Koeficient dielektrické absorpce (DAR):

Je měřen CA 6547 zkušebním napětím 500 V_{SS}. Přístroj vyhodnocuje okamžité hodnoty odporu měřené přístrojem CA 6547 a poté provede podíl hodnoty odporu v 1 minutě k hodnotě odporu v 30 sekundách. Koeficient dielektrické absorpce je měřen ve stejném intervalu jako izolační odpor co 20 hodin ve stavu naprázdno a co 4 hodiny při zatížení.

Polarizační index p_{10} :

Je měřen CA 6547 zkušebním napětím 500 V_{SS}. Jedná se o desetiminutový polarizační index. Zvolený desetiminutový polarizační index je z důvodu vyloučení vysokých rušivých proudů, při začátku měření. Rušivé proudy jsou způsobeny především vysokými vybíjecími proudy kapacit a dielektrickými posuvnými proudy. Polarizační index je podíl odporu změřeném v 10 minutě k odporu změřeném v 1 minutě. Interval jednotlivých měření je stejný jako u předešlých dvou parametrů.

Kapacita:

Je měřen CA 6547 zkušebním napětím 500 V_{SS}. Jelikož může přístroj měřit zkušebním napětím nízkým do 1000 V, ale i vysokým nad 500 V je vybaven vybíjecím obvodem. Kapacita se vyhodnocuje z vybíjecího proudu, známé hodnoty vybíjecího rezistoru a délky vybíjecího procesu. Velikost kapacity se objeví, až po úplném vybití obvodu. Interval jednotlivých měření je stejný jako u předešlých tří parametrů.

Test vybíjení dielektrika (DD):

Pro vícevrstvá dielektrika, kde je porušen pouze jeden izolant, ostatní vrstvy vykazují dostatečnou hodnotu izolačního odporu, jsou vypočtené hodnoty poměrů PI a DAR nedostatečné. Proto je nutné doplnit tato měření o test vybíjení dielektrika DD. Tento test ignoruje paralelní povrchové proudy.

Impulsní srovnávací zkouška:

Impulsní srovnávací zkouška je prováděná pomocí rázového generátoru proudu PSG 215 A. Jelikož se jedná o velmi rychlé změny, které nastávají vybíjením rázového generátoru do vinutí je třeba tyto změny zachytit pomocí dvoukanálového osciloskopu YOKOGAWA DL 750 SCOPE CORDER. Data se ukládají do interní paměti osciloskopu. Ty jsou dále zpracovány v programu Microsoft Excel nebo XYplot. Interval jednotlivých měření je měřen vždy na začátku a konci celého měření.

3.4 Měření asynchronního motoru nakrátko ve stavu naprázdno při teplotě -20 °C

Asynchronní motor je uložen v klimatické komoře. Na ovládacím panelu je nastavena teplota -20 °C v režimu chlazení. V tomto režimu klimatická komora začne chladit vždy, když teplota stoupne nad -20 °C. Rovnoměrné rozložení teploty se realizuje pomocí ventilační jednotky, která rozhání vzduch po celé klimatické komoře.

Motor byl uveden do chodu pomocí jističe LSN C6. Hřídel motoru nebyla nijak zatížena, brzda 2LM8 byla napájena po celou dobu měření, nekladla mechanický odpor rotoru.

Celkový čas měření při teplotě -20 °C, při chodu naprázdno je 80 hodin. Měření izolačního odporu, polarizačního indexu, činitele dielektrické absorpce, proudu, kapacity a testu vybíjení dielektrika byly provedeny vždy po 20 hodinách. Impulsní srovnávací zkouška byla provedena na počátku a konci celého měření, při teplotě -20 °C. Pro správné měření hodnot izolačního odporu je zapotřebí, aby byl asynchronní motor vypnut a ponechán v klidovém stavu nejméně 30 minut. Během této doby dochází k ustálení teploty motoru. Při měření musí být vypnuta klimatizační jednotka, neboť rozháněný vzduch působí negativně na měření, takto naměřené hodnoty velmi kolísají a nedojde k ustálení měřených hodnot.

Obrázky znázorňující vyvíjející se trend zdánlivého izolačního odporu a ostatních měřených veličin jsou pouze pro jednu fázi. Změřené výsledky jsou uvedeny v Tabulka 3.7, Tabulka 3.8, Tabulka 3.9.

Tabulka 3.7 Naměřené výsledky fáze U

t (hod)	I (nA)	R (GΩ)	DAR (-)	PI (-)	C (μF)	DD (-)
0	210,9	2,408	1	1,05	0,001	3,39
20	4,225	120,36	1,16	1,52	0,001	1,85
40	7,866	64,6	1,18	1,04	0,001	2,56
60	3,015	168,6	1,25	1,34	0,001	2,54
80	3,718	136,7	1,21	1,19	0,001	1,95

Tabulka 3.8 Naměřené výsledky fáze V

t (hod)	I (nA)	R (GΩ)	DAR (-)	PI (-)	C (μF)	DD (-)
0	250,3	2,03	1,01	1,04	0,001	3,79
20	6,983	72,76	1,38	1,02	0,001	2,03
40	9,073	56,06	1,17	0,68	0,001	2,37
60	3,923	129,5	0,98	1,58	0,001	2,5
80	3,828	132,8	1,15	1,24	0,001	1,95

Tabulka 3.9 Naměřené výsledky fáze W

t	I	R	DAR	PI	C	DD
(hod)	(nA)	(GΩ)	(-)	(-)	(μF)	(-)
0	242,5	2,095	1,01	1,05	0,001	3,66
20	6,108	83,1	1,33	1,23	0,001	2,35
40	5,993	84,86	1,32	1,47	0,001	2,47
60	5,085	99,9	1,12	1,27	0,001	2,53
80	3,514	144,6	1,2	1,15	0,001	2

Tabulka 3.10 Hraniční hodnoty

DAR	PI	stav izolace
<1,25	<1	Nedostatečný nebo nebezpečný
	<2	
<1,6	<4	Dobrý
>1,6	>4	Výborný

Tabulka 3.11 Hraniční hodnoty

DD	stav izolace
DD>7	Velmi špatný
7>DD>4	Špatný
4>DD>2	Nejasný
DD<2	Velmi dobrý

Před započítím měření v minusových teplotách byla provedena diagnostika izolačního systému.

Měření bylo provedeno při teplotě 20°C, relativní vlhkost dosahovala 30 %. Hladina zkušebního napětí byla 500 Vss. Takto získané hodnoty dosahovaly řádů jednotek GΩ, jak je patrné z výše uvedených tabulek. Změřená kapacita dosahovala malých hodnot, proto v následujících průbězích není vykreslena. Počáteční měření odhalilo poměrně velkou míru vlhkosti izolačního systému asynchronního motoru.

Podle Tabulka 3.10 a Tabulka 3.11 je izolace již v nedostatečném stavu, což potvrdil i test vybíjení dielektrika DD.

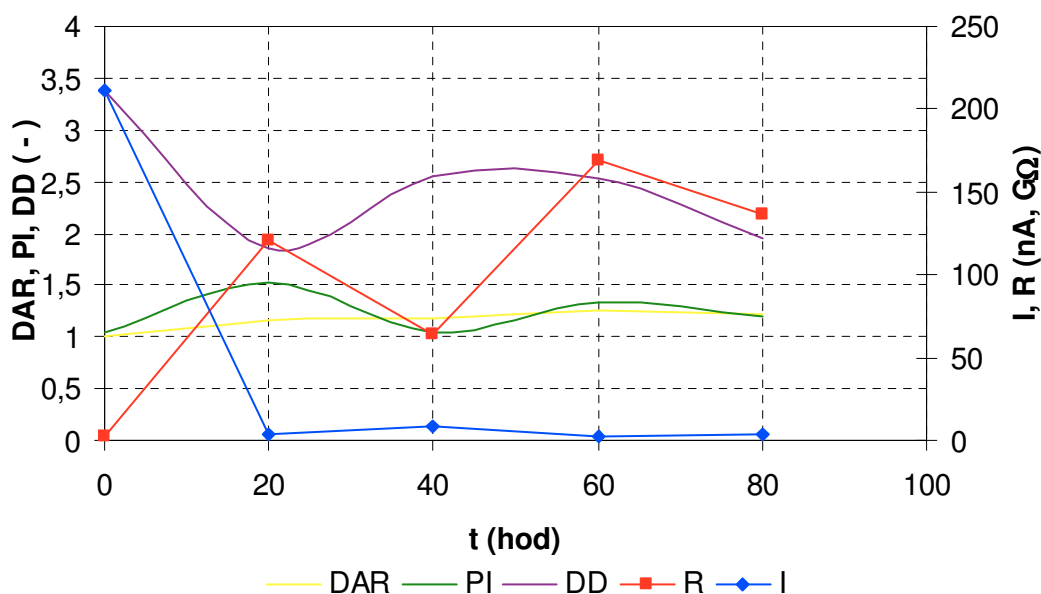
Po uvedení motoru do teploty -20 °C ve stavu naprázdno se parametry izolačního systému začaly velice rychle měnit. Relativní vlhkost v klimatické komoře dosahovala pod 20 %. Po prvních 20 hodinách, kdy byl motor v chodu vzrostl zdánlivý izolační odpor téměř 50 krát ve fázi U, přibližně 36 krát ve fázi V, přibližně 39 krát ve fázi W.

Tyto hodnoty dále rostly s jistým zakolísáním ve fázi U, V po 40 hodinách chodu motoru. Toto zakolísání bylo způsobeno nestejně rozdělenou teplotou v klimatické komoře. Izolační odpor asynchronního motoru je velice závislý na teplotě a relativní vlhkosti.

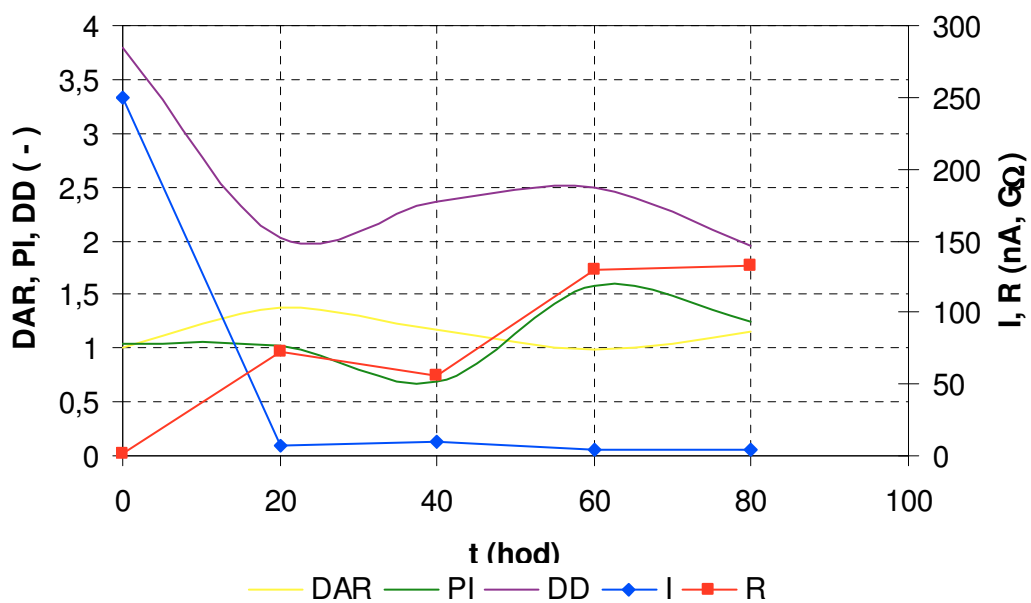
Vzhledem k tomu, že při velkém mrazu je nízká relativní vlhkost a izolační odpor ve všech fázích výrazně roste, potvrzuje se vysoká navlhlost izolace. Při kladných teplotách se nacházejí v izolačním systému malé fragmenty vodivé kapaliny, která se vyskytuje jak v tekutém tak plynném stavu. Mráz způsobí, že se malé zmražené částice od sebe oddělí. Následkem toho se zvyšuje izolační schopnost izolačního systému.

Při zmražení motoru na nízkou teplotu dochází ke zmražení a vytvrzení izolačního systému nízkou teplotou. To způsobí menší vodivost a tedy vyšší izolační schopnosti celého izolačního systému asynchronního motoru. Nasvědčují tomu všechny změřené hodnoty, nejvíce na fázi W Obr. 3.9, u které dochází k celkovému zlepšení zdánlivého izolačního odporu, proudu i koeficientu DD. Hodnoty koeficientů DAR, PI lehce kolísají, ovšem dá se říci, že se téměř nemění.

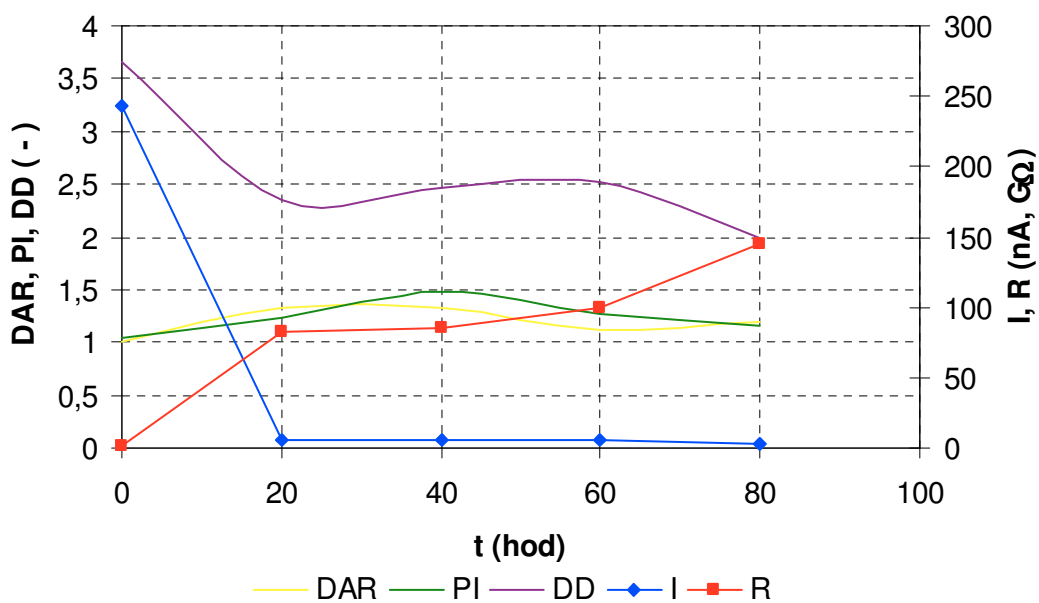
S ohledem na výsledky se dá říci, že provozování asynchronního motoru naprázdno při uvedených klimatických podmínkách, izolační systém motoru nevykazuje trend, který by vedl k rychlému opotřebení nebo následné poruše.



Obr. 3.7 Parametry izolačního systému fáze U za 80 hodin



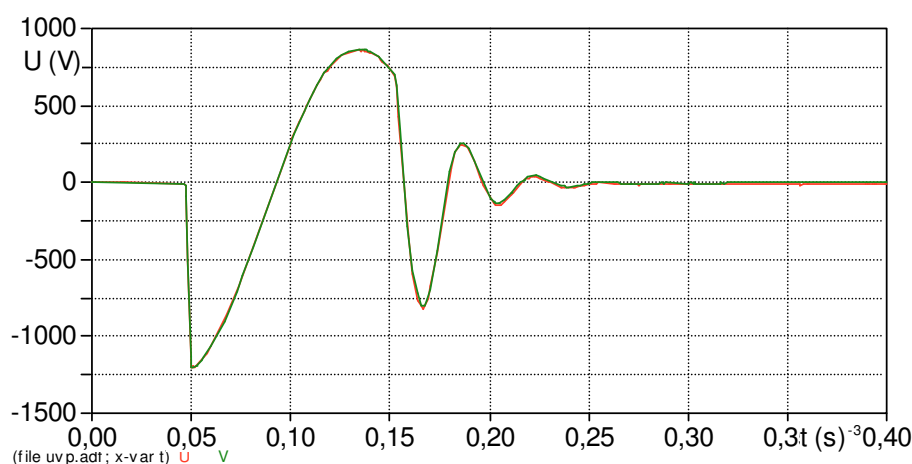
Obr. 3.8 Parametry izolačního systému fáze V za 80 hodin



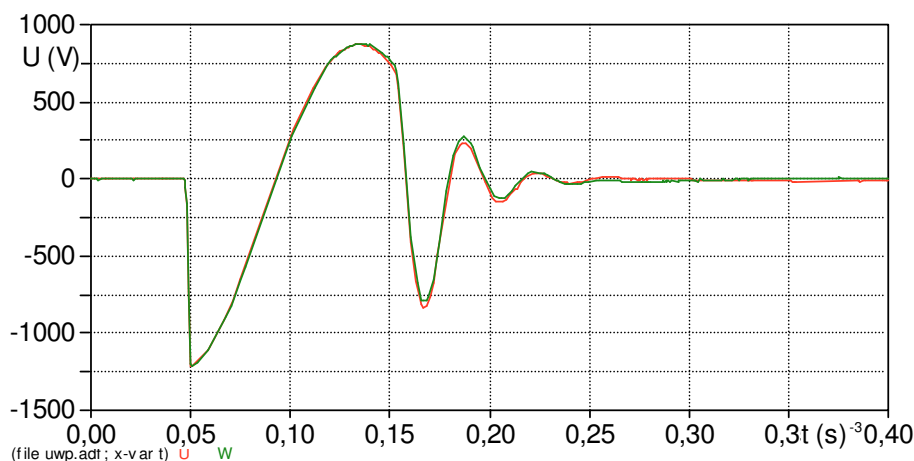
Obr. 3.9 Parametry izolačního systému fáze W za 80 hodin

3.4.1 Impulsní srovnávací zkouška po 80 hodinách chodu ve stavu naprázdno při teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Impulsní srovnávací zkouška odhaluje poruchu vinutí, tedy mezi-závitové zkraty. Poté co byl asynchronní motor vystaven teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve stavu naprázdno, neprokázala impulsní srovnávací zkouška zásadní rozdíl mezi jednotlivými fázemi (Obr. 3.10, Obr. 3.11, Obr. 3.12). Reakce na strmou vlnu je u všech fází stejná. Pro přesné vyhodnocení je proveden rozdíl ploch ve stejných časových okamžicích.

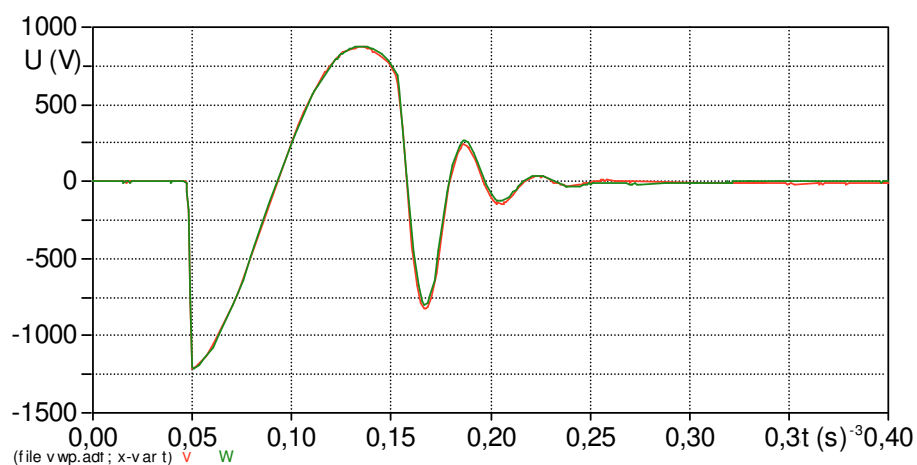


Obr. 3.10 Časový průběh napětí fáze U, V

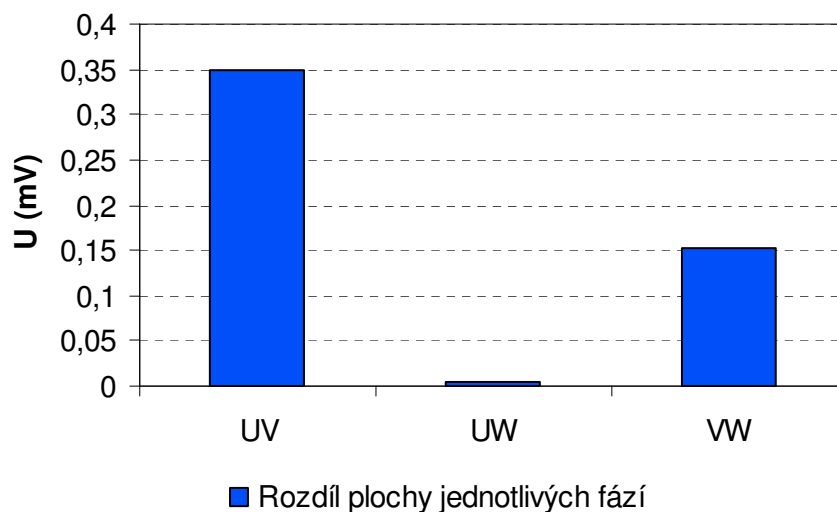


Obr. 3.11 Časový průběh napětí fáze U, W

Pro jednoduchost výpočtu byl rozdíl počítán z první kladné plochy. Plocha je ohraničená časovou osou a křivkou v časovém intervalu $\langle 9,3\text{e-}5; 15,75\text{e-}5 \rangle$. Maximální hodnota, které kmit dosáhne je 1200 V. Při měření impulsní srovnávací zkouškou je třeba dbát na krátký čas vystavení vinutí rázovým vlnám, neboť každá zkouška namáhá izolační systém a může vést k nezvratným změnám v izolačním systému. Měření bylo provedeno při pokojové teplotě a po době nezbytné k vypaření povrchové vlhkosti, zároveň byl stroj teplotně ustálen.



Obr. 3.12 Časový průběh napětí fáze V, W



Obr. 3.13 Rozdíl ploch jednotlivých fází

Vypočtený rozdíl ploch jednotlivých fází znázorňuje Obr. 3.13. Z tohoto obrázku je patrné, že jednotlivé odchylky jsou v řádech milivoltů. Nejmenší rozdíl vyšel na fázích U, W. Z tohoto se dá usuzovat, že na fázi V již došlo k nějaké změně na vinutí. Rozdíl je však zatím velmi malý.

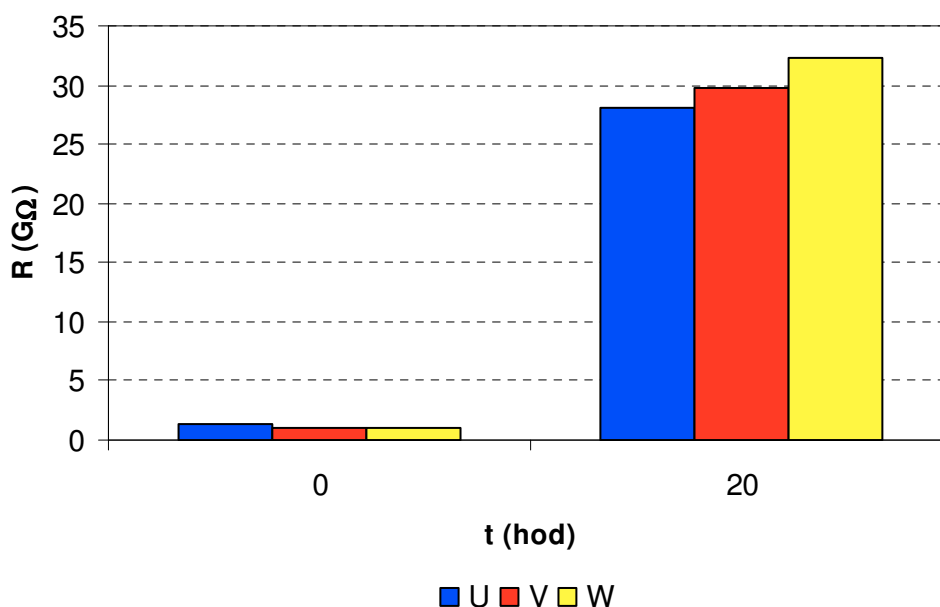
3.5 Měření asynchronního motoru nakrátko ve stavu naprázdno při teplotě 40 °C

Asynchronní motor byl stejně jako v předchozím případě uložen do klimatické komory, kde byl vystaven klimatickým podmínkám o teplotě 40 °C. Asynchronní motor běžel naprázdno bez jakéhokoli zatížení. Na ovládacím panelu klimatické komory byla nastavena teplota 40 °C.

Bohužel měření se nemohlo uskutečnit až dokonce, tedy asynchronní motor nemohl pracovat v chodu naprázdno po dobu 80 hodin při teplotě 40 °C, ale došlo k přehřátí celé klimatické komory na teplotu 80 °C. Tato porucha byla zjištěna po 20 hodinách provozu asynchronního motoru v klimatické komoře.

Problém regulace klimatické komory spočívá v možnosti chlazení do určité implicitně nastavené hodnoty v našem případě 20 °C. Tato hodnota je nejvyšší možná hodnota, která se dá nastavit v režimu chlazení. Dále je třeba znát režim topení, ve kterém se klimatická komora nacházela. Tento režim umožňuje vyhřátí okolního prostředí v klimatické komoře na určitou teplotu, maximálně však 60 °C. Klimatická komora reguluje teplotu v režimu topení pomocí relé, které při dosažení zadané teploty vypne topnou spirálu a pomocí ventilace rovnoměrně rozhání klima po celé klimatické komoře.

Asynchronní motor má relativně vysoký proud naprázdno, a to sice 84 % jmenovitého proudu. Účinnost měřeného asynchronního motoru je 71 %. Účinník $\cos \varphi$ dosahuje poměrně nízkých hodnot 0,77. Ztráty naprázdno jsou 250 W. Z asynchronního motoru se potom stává velice dobrý topný prvek.



Obr. 3.14 Zdánlivé izolační odpory před a po přehřátí KK

Jestliže komora reguluje teplotu pouze tím, že přestane topit, nastává havarijní situace v podobě naakumulovaného tepla, které dodává asynchronní motor. Vzhledem k dobré izolační schopnosti klimatické komory vystoupá a ustálí se teplota na 80 °C.

Vlivem vysoké teploty v klimatické komoře došlo k nezvratným změnám v izolačním stavu asynchronního motoru. Mezi ty zásadní patří zvětšení izolačního odporu o více jak 20 krát v každé fázi. Přehled kolikrát se zvýšil izolační odpor v dané fázi lze vidět v Tabulka 3.12, Tabulka 3.13, Tabulka 3.14.

Tabulka 3.12

U	Násobek
R	21,60

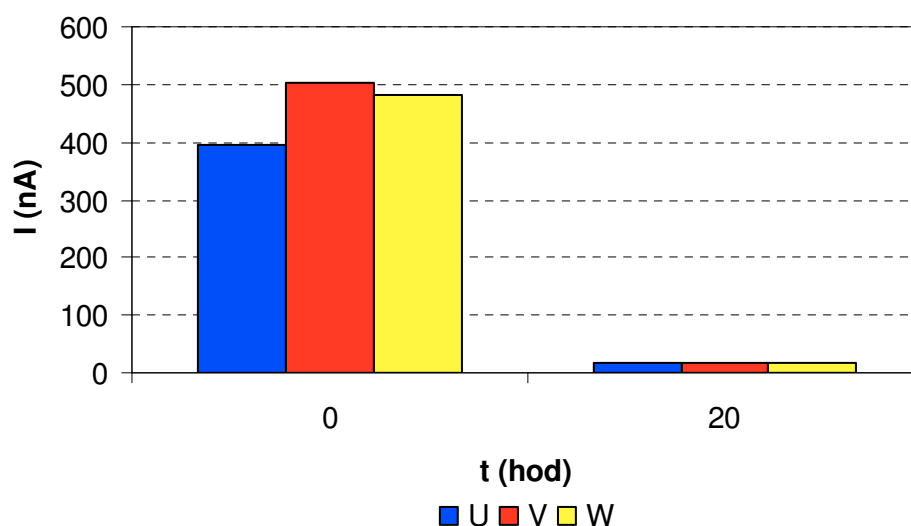
Tabulka 3.13

V	Násobek
R	29,50

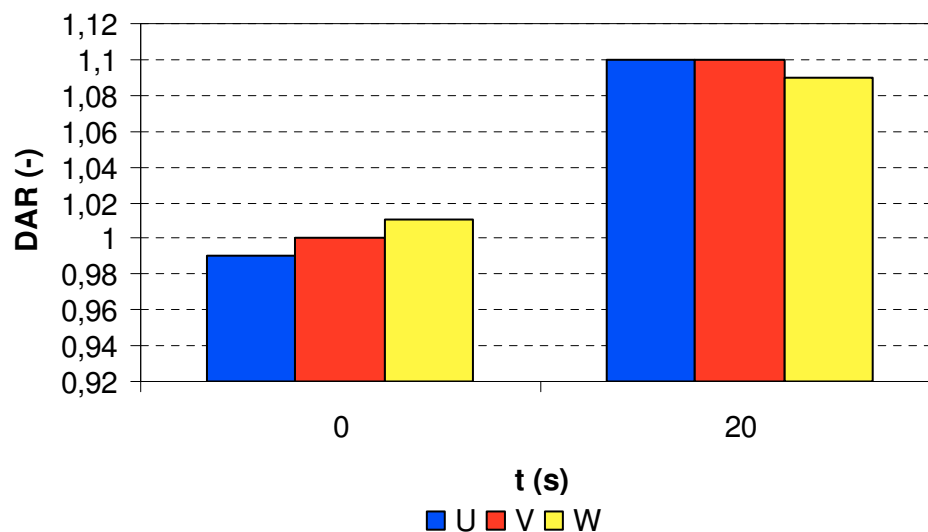
Tabulka 3.14

W	Násobek
R	30,69

Teplota 80 °C znamená, že asynchronní motor musel dosahovat teploty vyšší, než teplota okolí. Izolační systém prošel strukturální změnou, kde se izolace při vysoké teplotě vypekla a zbavila se jisté části nečistot tvořící větší vodivost celého izolačního systému. Patrně největší kladné změny dosáhla izolace fáze W Obr. 3.14, Obr. 3.15.



Obr. 3.15 Proudý před a po přehřátí KK

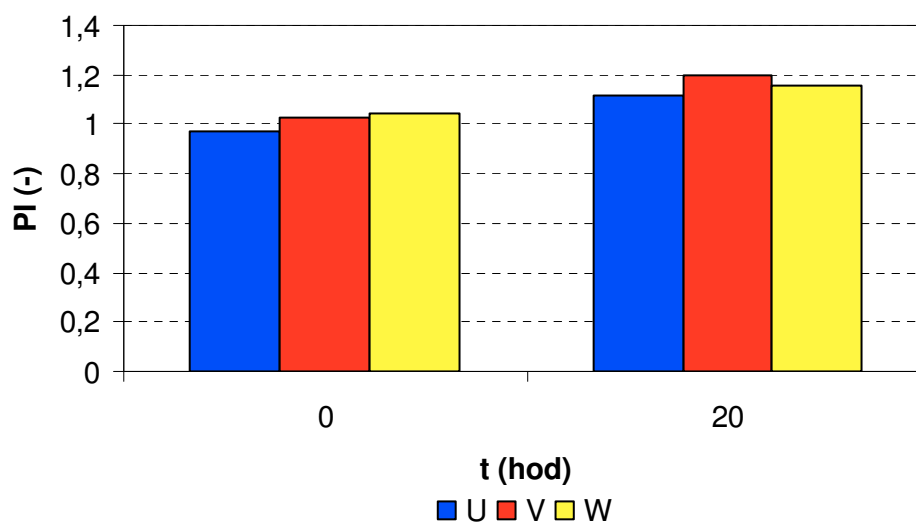


Obr. 3.16 DAR před a po přehřátí KK

Koeficient dielektrické absorpce počítá měřicí přístroj jako podíl hodnot:

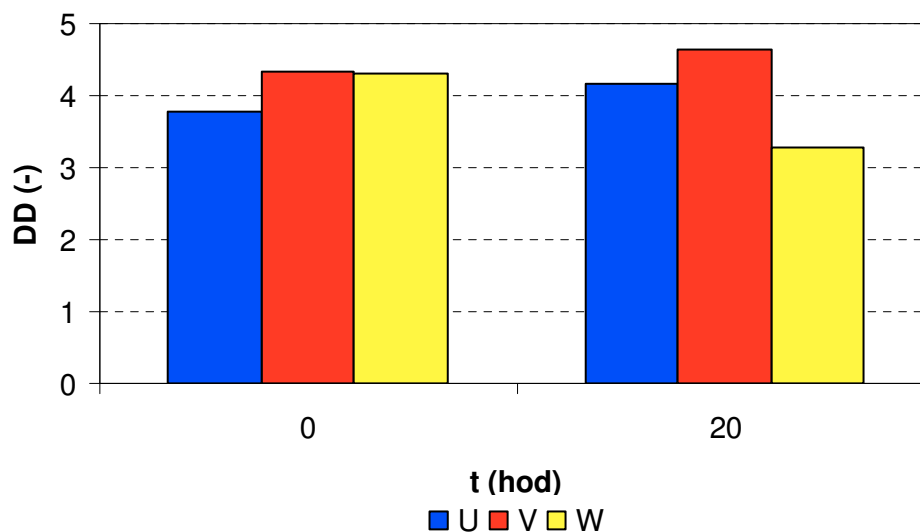
$$DAR = \frac{R_{60}}{R_{30}} \quad (16)$$

Zlepšení dielektrické absorpce dokazuje i průběh křivek izolačních odporů na Obr. 3.19. Strmost křivek a zlepšení DAR znamená trvalou strukturální přeměnu části izolačního systému asynchronního stroje.

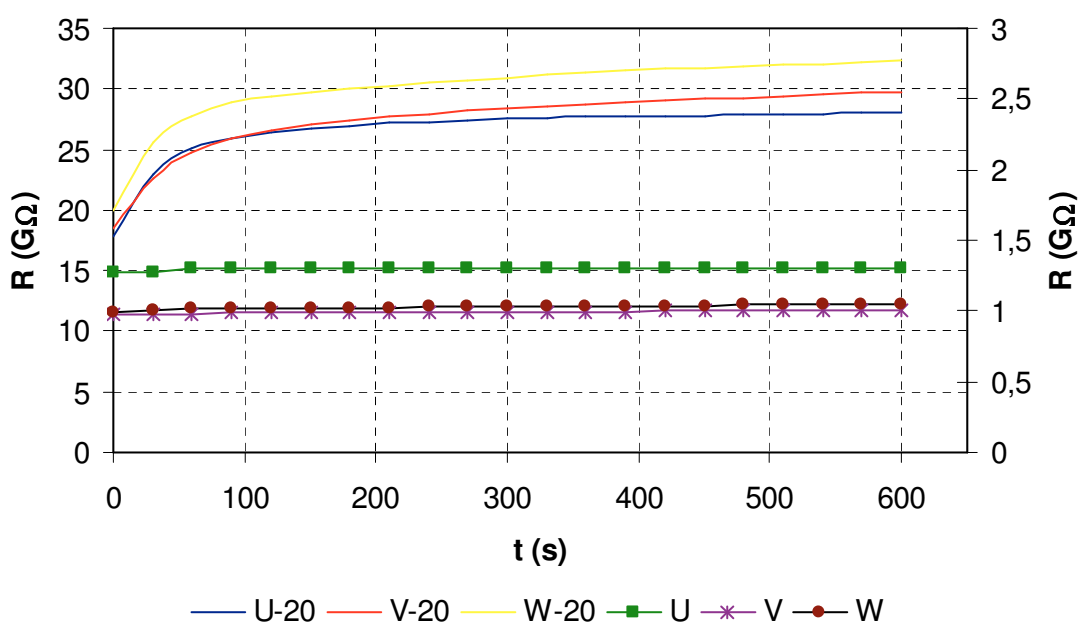


Obr. 3.17 PI před a po přehřátí KK

DAR (Obr. 3.16) však posuzuje změnu jen v krátkém časovém okamžiku, a pouze v první desetinné měření. K posouzení slouží především polarizační index. Z obrázku Obr. 3.17 je patrná jen malá změna v hodnotách polarizačního indexu.



Obr. 3.18 DD před a po přehřátí KK



Obr. 3.19 Průběhy izolačních odporů před a po přehřátí KK

V předchozí kapitole se potvrdila zvýšená vlhkost izolačního systému asynchronního motoru. Tuto skutečnost potvrdil trend polarizačního indexu a koeficientu dielektrické absorpce. V případě, že byl motor vystaven extrémní teplotě 80 °C po dobu 20 hodin při relativní vlhkosti 1 %, vlhkost izolačního systému by se měla rapidně snížit. Ovšem výsledky polarizačního indexu se změnil v řádu desetin (Obr. 3.17). Z výsledků změřených po době, kdy byl motor vystaven extrémnímu prostředí, se dá konstatovat, že izolační systém obsahuje nečistoty způsobující horší kvalitu izolačních vlastností celého stroje.

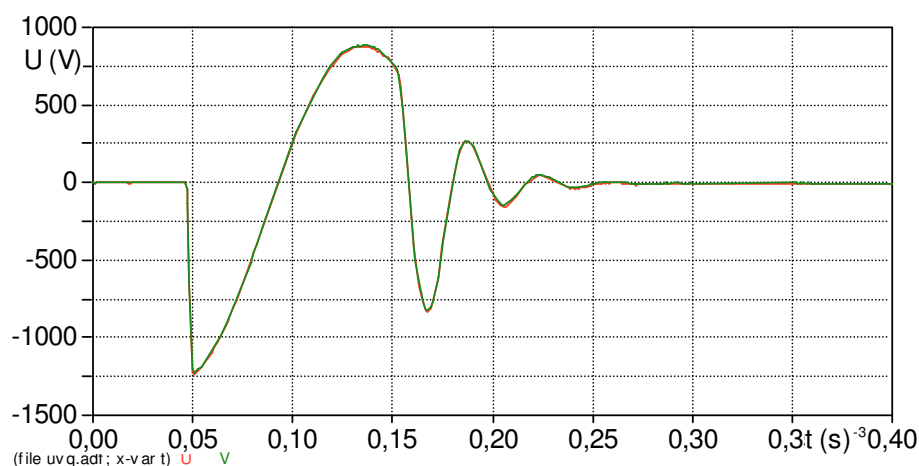
Průběhy izolačního odporu na Obr. 3.19 dokládají jisté zlepšení izolačních schopností, avšak předchozí metody neodhalí, zda může být v dielektriku porušená vrstva nebo vrstvy izolačního materiálu. Pomocí metody testu vybíjení dielektrika DD se dá zjistit, jestli k porušení některé z vrstev nedochází nebo nedošlo. Test DD ignoruje paralelní povrchové unikající proudy. Hraniční hodnoty popisuje Tabulka 3.11.

Z naměřených výsledků Obr. 3.18 vyplývá, že je stav izolačního systému asynchronního motoru je nejasný (Tabulka 3.11). Ve fázi W došlo ke snížení koeficientu DD, což mohlo být způsobeno spečením některých vrstev a vlastní přeměnou jednotlivých izolačních vrstev vlivem teploty.

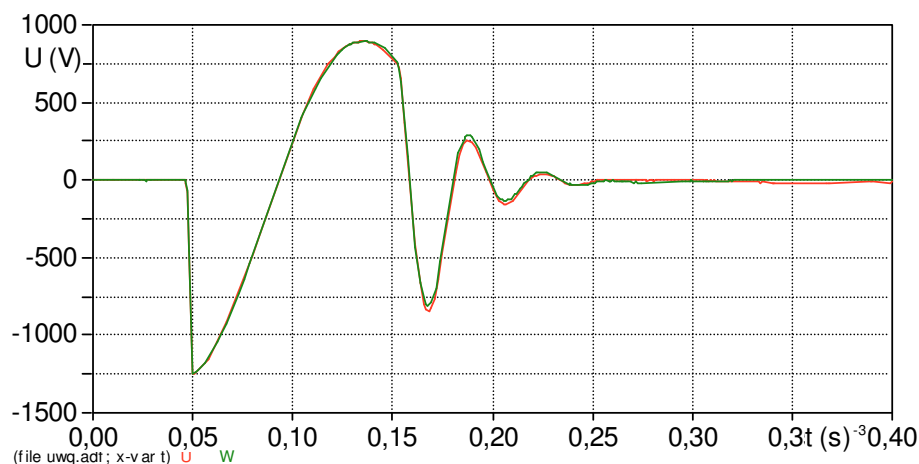
Asynchronní motor po vystavení extrémním podmínkám byl bez poruchy a schopen dalšího provozu.

3.5.1 Impulsní srovnávací zkouška po 20 hodinách chodu ve stavu naprázdno při teplotě 80°C

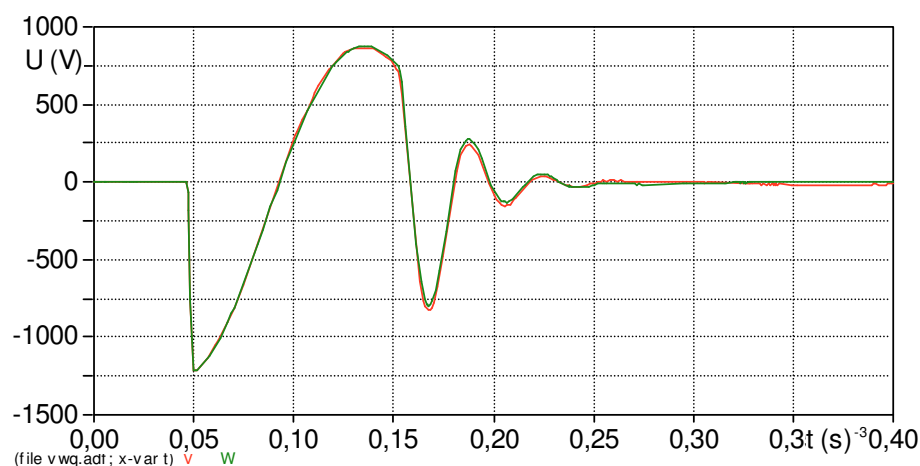
Impulsní zkouška měřená po vychladnutí asynchronního motoru byla velmi důležitá. Asynchronní motor byl vystaven extrémní teplotě 80 °C a bylo tedy mnohem větší riziko poruchy vinutí motoru. Asynchronní motor nebyl zatížen, tudíž mechanický moment vyvíjený na vinutí v drážkách nebyl tak vysoký jako za normálních provozních podmínek. Velkou roli hrála teplota, která mohla zapříčinit spečení nebo přilepení jednotlivých závitů k sobě (Obr. 3.20, Obr. 3.21, Obr. 3.22).



Obr. 3.20 Časový průběh napětí fáze U, V po přehřátí KK

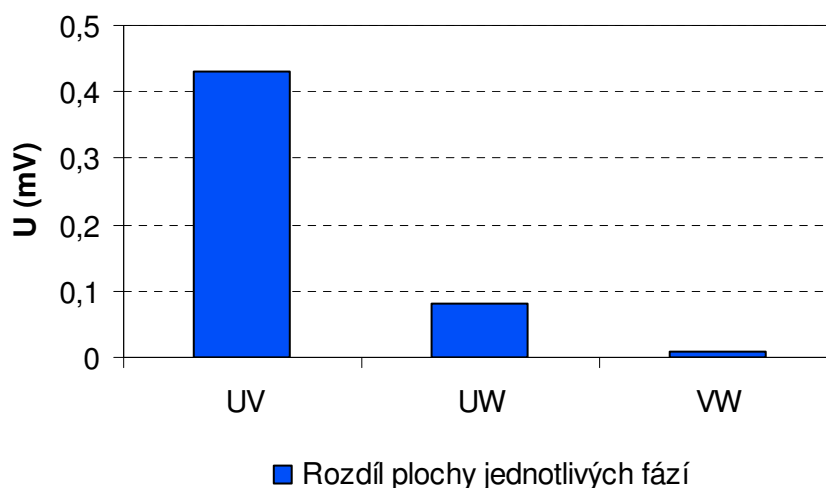


Obr. 3.21 Časový průběh napětí fáze U, W po přehřátí KK



Obr. 3.22 Časový průběh napětí fáze V, W po přehřátí KK

Již z obrázků Obr. 3.20, Obr. 3.21, Obr. 3.22 je patrné, že k žádné závažné mezi-závitové poruše nedošlo. Vinutí asynchronního motoru po provedení impulsní srovnávací zkoušky nevykazuje poruchu. Ze změřených průběhů není zřejmý rozdíl v jednotlivých kmittech vinutí fází, ale Obr. 3.13 dokazuje, že k degradaci vinutí přece jen došlo.



Obr. 3.23 Rozdíl ploch jednotlivých fází

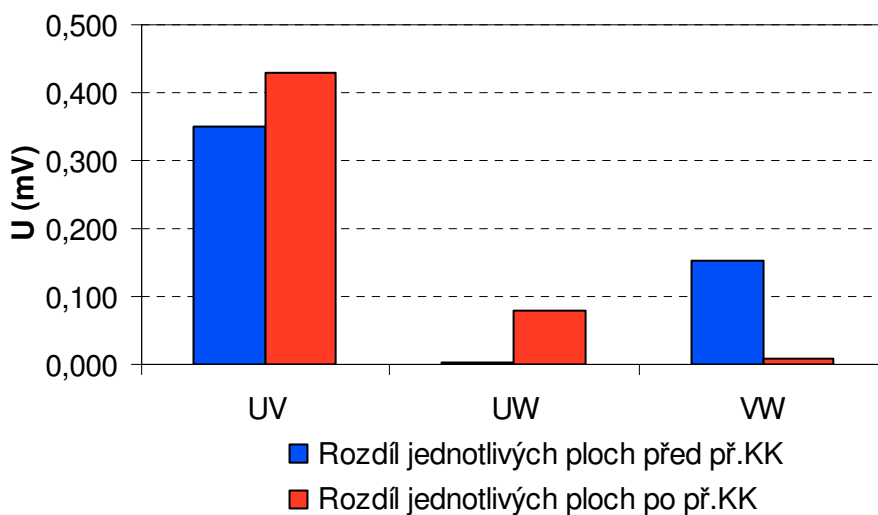
V kapitole 3.4.1 je vyhodnocen rozdíl ploch jednotlivých kmitů fází (Obr. 3.13) v jasně definovaném časovém intervalu. Pro správné posouzení změn nastalých po měření při teplotě 40 °C tedy po vystavení asynchronního motoru teplotě 80 °C po dobu 20 hodin, je třeba provést rozdíl ploch jednotlivých kmitů fází ve stejném intervalu Obr. 3.23.

Na obrázku Obr. 3.13 je vidět, že rozdíl vybraných ploch mezi fázemi U a W je minimální, z toho vyplývá horší stav vinutí fáze V. Na rozdíl od předchozího stavu nastává v asynchronním motoru změna, na kterou upozorňuje sloupec UW. Rozdíl ploch sloupce UW se zvýšil o 0,0763 mV, a zároveň se snížil rozdíl ploch sloupce VW o 0,1424 mV. Rozdíl ploch mezi vinutími fáze U a Fáze V je 0,0795 mV.

Největší negativní účinky extrémní teploty na vinutí asynchronního motoru byly zjištěny u fáze W, která se tímto izolačním stavem blíží vinutí fázi V. Dále bylo zaznamenáno malé zhoršení izolačního stavu vinutí fáze U. V Tabulka 3.15 je uveden rozdíl jednotlivých ploch, který je níže znázorněn na Obr. 3.24.

Tabulka 3.15 Rozdíl ploch

Stav	Rozdíl plochy		
	UV	UW	VW
	(mV)	(mV)	(mV)
- 20 °C	0,350	0,004	0,152
40 °C	0,430	0,080	0,009

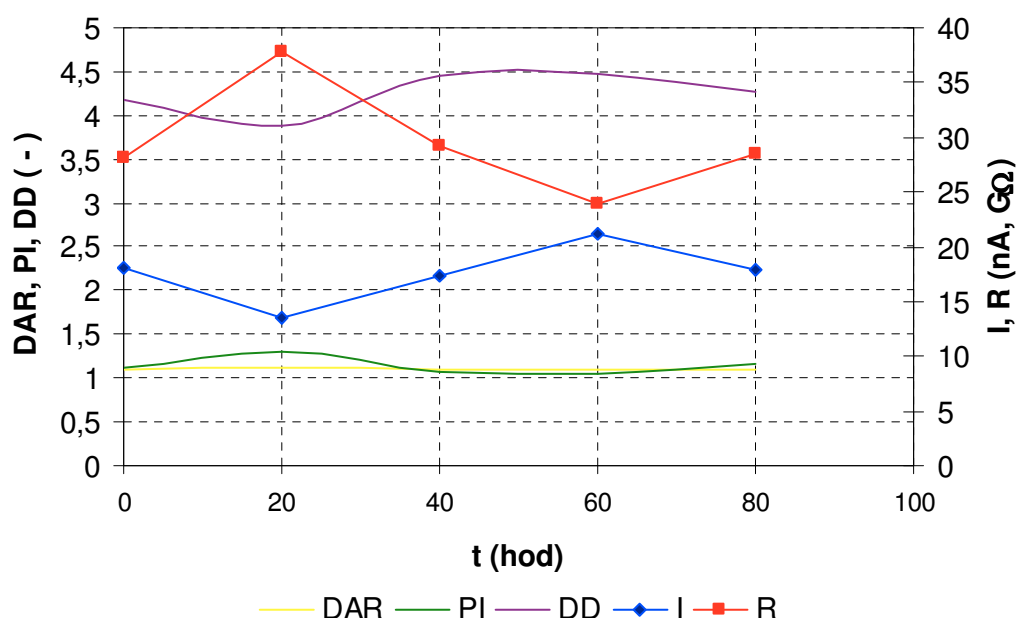


Obr. 3.24 Porovnání rozdílů ploch jednotlivých fází

3.6 Měření asynchronního motoru nakrátko ve stavu naprázdno při teplotě 20 °C

Při měření asynchronního motoru naprázdno ve stavu nakrátko při teplotě 20 °C byl motor umístěn opět v klimatické komoře. Jelikož jsou tepelné ztráty dost vysoké, klimatická komora by se opět přehřála, musela být klimatická komora nastavena v režimu chlazení na nejvyšší možnou teplotu 20 °C. Tímto bylo zajištěno neustálé regulování teploty na 20 °C i při chodu asynchronního motoru.

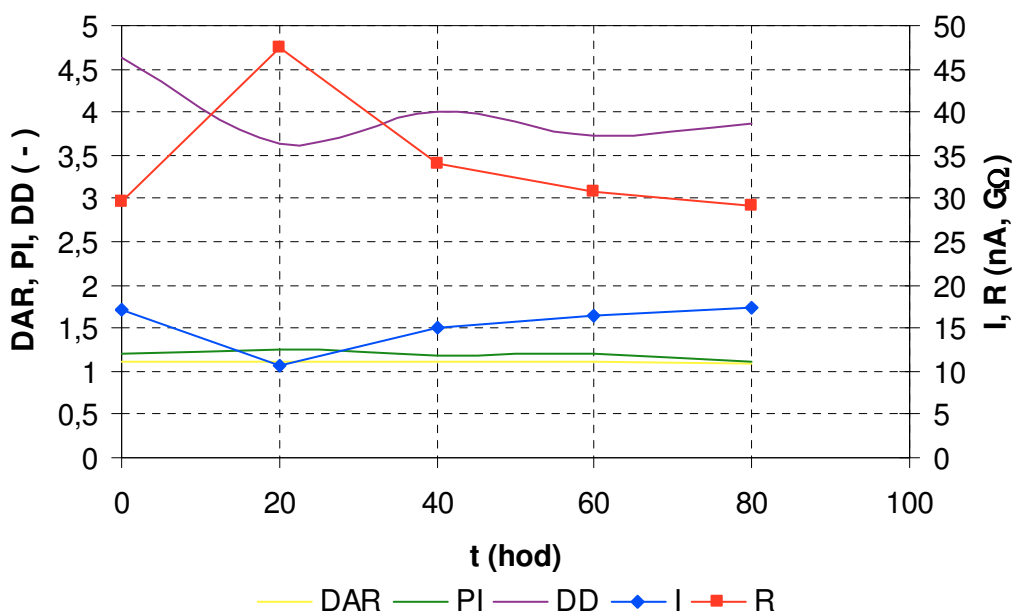
Z hlediska provozních vlastností obecně elektrického zařízení je teplota 20 °C nejméně destruktivní klima, za předpokladu relativní vlhkosti okolí do 40 %. Asynchronní motor byl v chodu naprázdno 80 hodin. Jednotlivá měření byla prováděna po 20 hodinách při teplotě 20 °C.



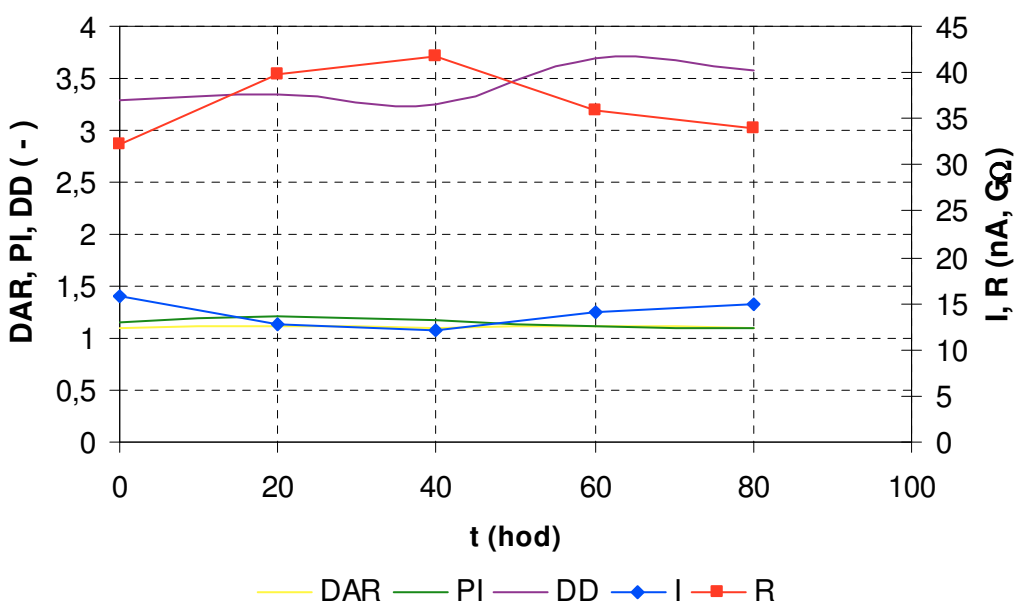
Obr. 3.25 Parametry izolačního systému fáze U za 80 hodin

Vývoj změřených hodnot při teplotě 20 °C se dá označit za kolísavý Obr. 3.25. Velikost izolačního odporu fáze U se ustálila, při prvním měření na hodnotě 28,06 GΩ. Po 20 hodinách chodu byl zaznamenán prudký vzestup, ovšem to je pouze extrém této křivky. Jeho velikost poté klesla na hodnotu 24 GΩ, a nakonec je výsledek izolačního odporu velmi blízký počátečnímu stavu 28,47 GΩ.

Velikostem odporů odpovídá naměřený proud. U tohoto měření nedocházelo k velikým teplotním výkyvům v klimatické komoře. Na rozdíl od měření při -20 °C se v klimatické komoře vytvářela větší relativní vlhkost okolo 38 – 40 %. Z obrázku Obr. 3.25 je patrné, že polarizační index kolísá ve stejných časových intervalech jako izolační odpor. Tedy příčinou kolísání může být velikost relativní vlhkosti v klimatické komoře.



Obr. 3.26 Parametry izolačního systému fáze V za 80 hodin



Obr. 3.27 Parametry izolačního systému fáze W za 80 hodin

U fáze V dochází k podobnému průběhu po dobu 80 hodin jako je tomu u fáze U. Ani v jedné fázi nedochází k výrazné změně polarizačního indexu, koeficientu dielektrické absorpce. Celkově nejlepší výsledky má fáze W, kde se dosahuje největšího izolačního odporu i ostatní měřené veličiny mají lepší výsledky. Měření při 20 °C dokazuje, že toto klima má minimální vliv na izolační systém. Zaznamenané průběhy a změny souvisí s kvalitou izolačního systému. Naměřené výsledky jsou uvedené v následujících tabulkách: Tabulka 3.16, Tabulka 3.17, Tabulka 3.18.

Tabulka 3.16 Naměřené výsledky fáze U

t (hod)	I (nA)	R (GΩ)	DAR (-)	PI (-)	C (μF)	DD (-)
0	18,1	28,06	1,1	1,12	0,001	4,17
20	13,46	37,76	1,12	1,31	0,001	3,89
40	17,36	29,28	1,1	1,08	0,001	4,46
60	21,19	24	1,09	1,05	0,001	4,47
80	17,84	28,47	1,1	1,17	0,001	4,28

Tabulka 3.17 Naměřené výsledky fáze V

t (hod)	I (nA)	R (GΩ)	DAR (-)	PI (-)	C (μF)	DD (-)
0	17,08	29,74	1,1	1,2	0,001	4,63
20	10,7	47,4	1,12	1,26	0,001	3,63
40	14,97	33,94	1,1	1,18	0,001	4,01
60	16,49	30,8	1,11	1,21	0,001	3,73
80	17,43	29,16	1,09	1,1	0,001	3,87

Tabulka 3.18 Naměřené výsledky fáze W

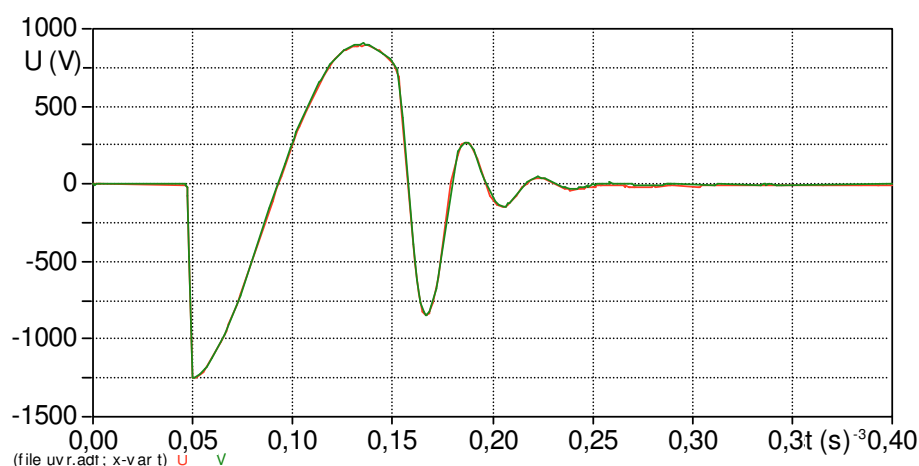
t (hod)	I (nA)	R (GΩ)	DAR (-)	PI (-)	C (μF)	DD (-)
0	15,73	32,29	1,09	1,16	0,001	3,28
20	12,77	39,8	1,11	1,21	0,001	3,35
40	12,19	41,7	1,1	1,18	0,001	3,25
60	14,12	35,98	1,11	1,12	0,001	3,69
80	15,01	33,86	1,09	1,1	0,001	3,58



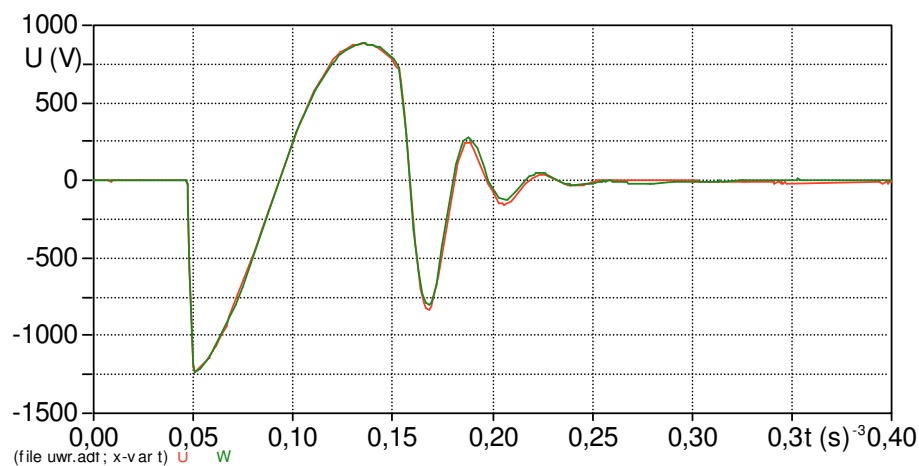
Obr. 3.28 Asynchronní motor 1LA7096-6AA10-Z

3.6.1 Impulsní srovnávací zkouška po 80 hodinách chodu ve stavu naprázdno při teplotě 20°C

Impulsní srovnávací zkouška při teplotě 20 °C se prováděla na závěr po ustálení teplot. Teplotní i silové namáhání vinutí bylo minimální vzhledem k tomu, že nebyl motor zatěžován. Ze změřených dat vyplývá, že na jednotlivých vinutích nedošlo k mezi-závitovému zkratu. Na obrázcích Obr. 3.29, Obr. 3.30, Obr. 3.31 jsou zaznamenány průběhy jednotlivých fází mezi sebou.

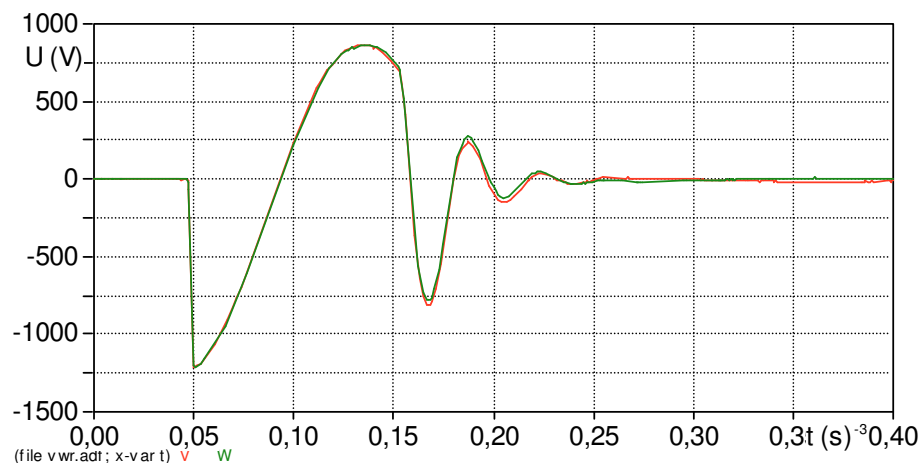


Obr. 3.29 Časový průběh napětí fáze U, V



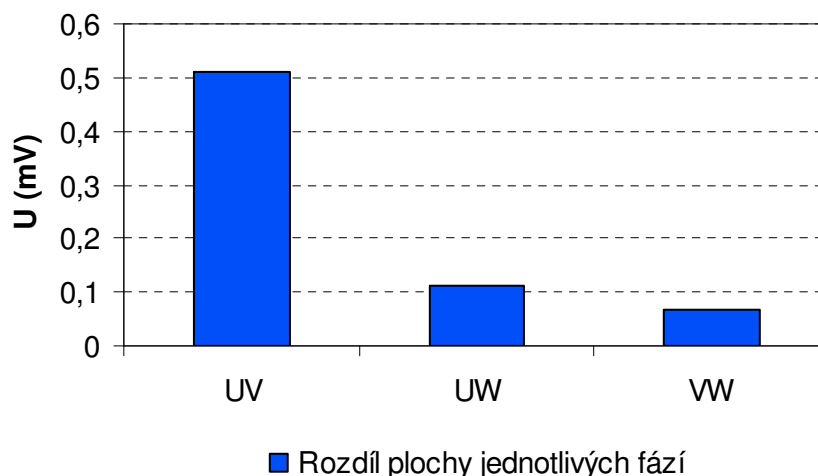
Obr. 3.30 Časový průběh napětí fáze V, W

Jistý malý rozdíl od minulého měření je ovšem i zde. Posouzením rozdílu plochy v určitém časovém intervalu určí, zda došlo k nějaké změně, a na kterém vinutí dané fáze.



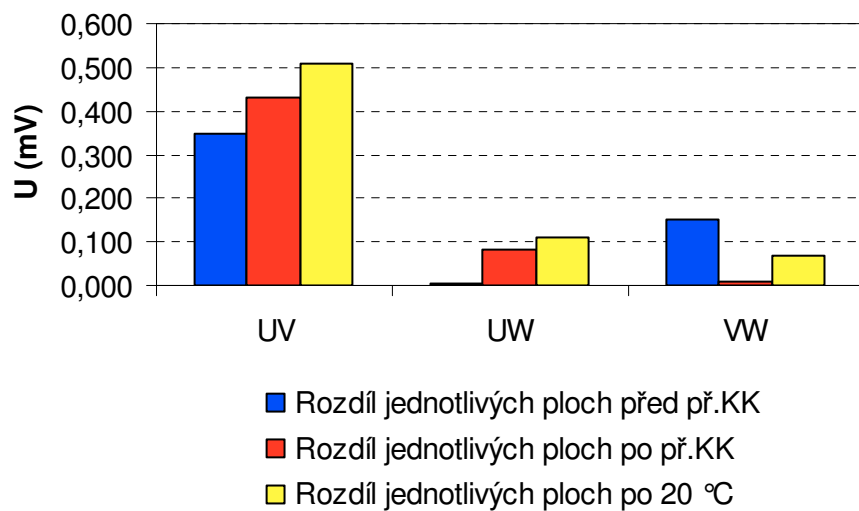
Obr. 3.31 Časový průběh napětí fáze V, W

Na Obr. 3.32 můžeme vidět vývoj rozdílu ploch jednotlivých fází. U předchozího měření byl rozdíl ploch mezi vinutími fází U a V o 0,1 milivolt menší.



Obr. 3.32 Rozdíl ploch jednotlivých fází

Z těchto údajů se nedá jednoznačně říci, které vinutí se nachází v horším stavu. Rozdíl plochy se zvětšil u všech vzájemných měření, tedy ke zhoršení izolačního stavu došlo na všech fázích. Největší změnu prodělalo vinutí V, pravděpodobně se tedy bude nacházet v nejhorším stavu. U stanovení prognózy je třeba brát v potaz předchozí výsledky. Celkový přehled trendu jednotlivých fází je znázorněn na Obr. 3.33. Všechny vynesené výsledky na Obr. 3.33, Obr. 3.33 jsou uvedeny v Tabulka 3.19.



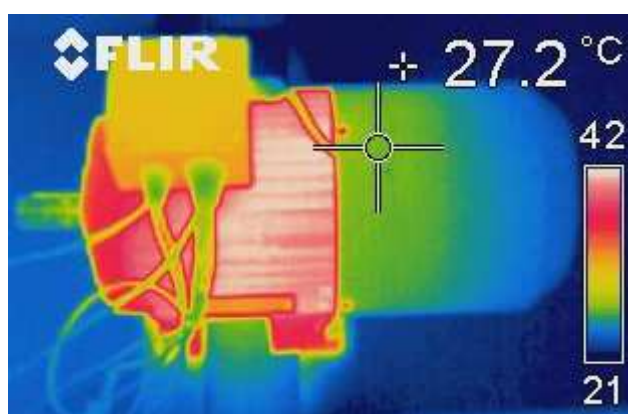
Obr. 3.33 Porovnání rozdílu ploch jednotlivých fází

Tabulka 3.19 Rozdíl ploch

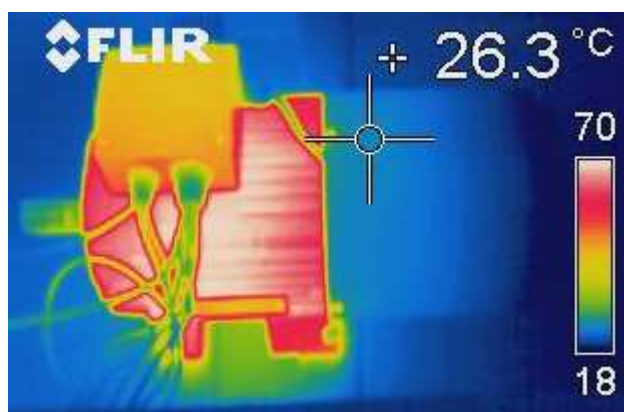
Stav	Rozdíl plochy		
	UV	UW	VW
	(mV)	(mV)	(mV)
- 20 °C	0,350	0,004	0,152
40 °C	0,430	0,080	0,009
20 °C	0,510	0,111	0,069

3.7 Měření asynchronního motoru nakrátko v zatíženém stavu

Jelikož chladicí výkon klimatické komory není dostatečně velký pro uchazení motoru v zatíženém stavu je asynchronní motor zatěžován v klimatických podmínkách laboratoře. Asynchronní motor je z bezpečnostních důvodů i tak umístěn v klimatické komoře s otevřeným otevíracím dílem. Zatížení na hřídeli asynchronního motoru je realizováno pomocí pružinové brzdy 2LM8, která byla nastavena na nejmenší brzdící moment 18,2 Nm. Při tomto brzděném momentu motor není zatížen na hodnotu jmenovitého proudu. Proud statoru dosahuje 118 % jmenovitého proudu, což je 3,5 A. Velikost tepla uvolněná třením brzdných kotoučů je značná, teplota neměla přesahovat hodnotu 130 °C, kdy dochází k nadměrnému a provozně nebezpečnému opotřebení brzdných kotoučů. Z toho důvodu nebylo možné zatěžovat motor kontinuálně. Teplo způsobené brzděním výrazně neovlivnilo chod motoru, neboť samotný motor vyvíjel velký ztrátový tepelný výkon, což je vidět na Obr. 3.34, Obr. 3.35.

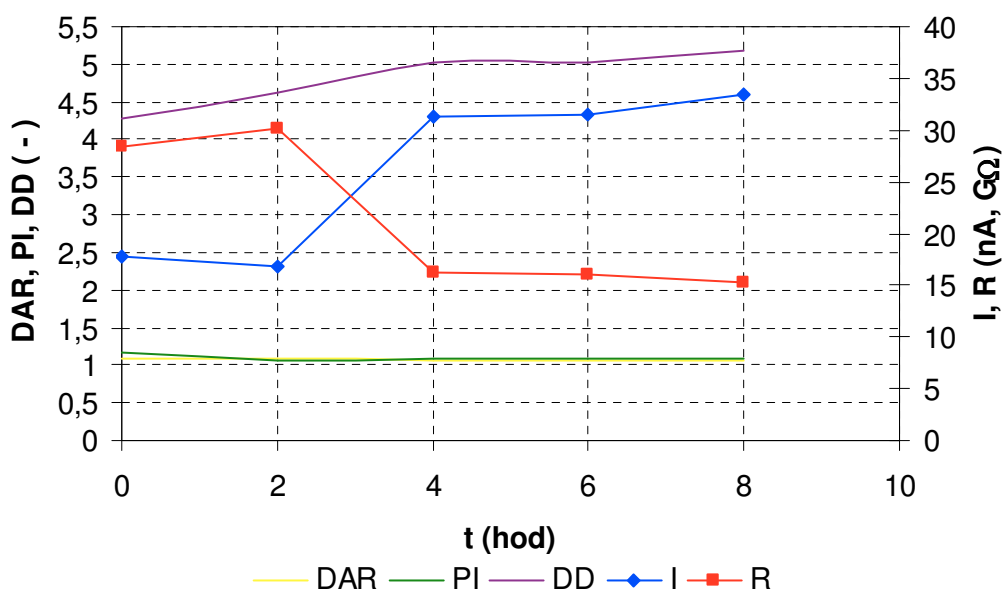


Obr. 3.34 Termovizní snímek asynchronního motoru v chodu naprázdno

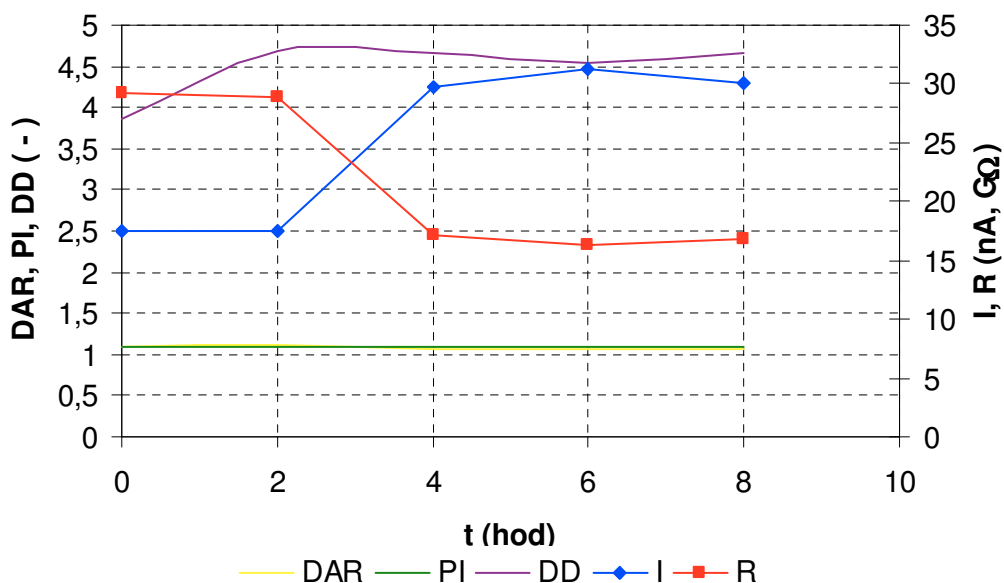


Obr. 3.35 Termovizní snímek asynchronního motoru v zatíženém stavu

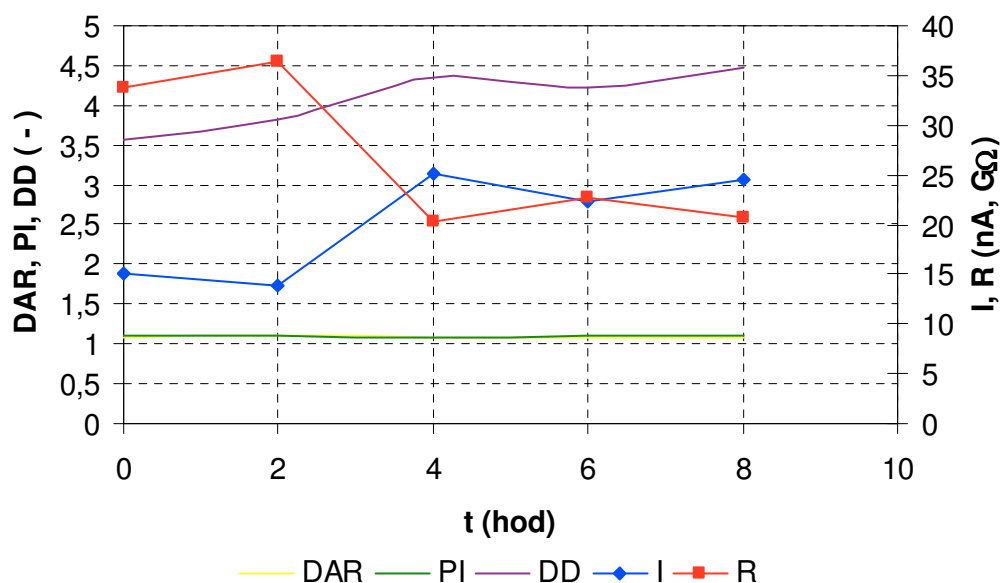
Z Obr. 3.35 je dobře vidět velikost rozložení teploty na motoru. Zatěžování motoru mělo za následek zhoršení izolačních vlastností asynchronního motoru. Na Obr. 3.36, Obr. 3.37 je možné vidět podobný průběh snímaných veličin a koeficientů. Izolační odpor má při výše uvedeném zatěžování asynchronního motoru klesající charakter. Největší vliv na zhoršení izolačního systému měla teplota, která dosahoval hodnot i nad 70 °C. Z trendu křivky zdánlivého izolačního odporu je patrná rychlá degradace izolačního systému. Na rozdíl od předchozích měření se hodnoty zdánlivého izolačního systému už nevrátily na původní hodnotu, jedná se tedy o nezvratné změny. Rozdíl izolačního odporu na začátku a na konci měření je 13,3 GΩ u fáze U, 12,29 GΩ u fáze V a 13,15 GΩ u fáze W.



Obr. 3.36 Parametry izolačního systému fáze U za 8 hodin



Obr. 3.37 Parametry izolačního systému fáze V za 8 hodin



Obr. 3.38 Parametry izolačního systému fáze W za 8 hodin

Vzhledem k teplotě působící při zatížení motoru se dá opět předpokládat velmi nízký výskyt relativní vlhkosti. Výsledky PI a DAR jsou hodnoty téměř rovné 1. To podle Tabulka 3.10 napovídá o velmi špatném stavu izolačního systému. Potvrzují se pravděpodobné nečistoty v izolačním systému.

Fáze W dosahuje o více jak 3 GΩ lepších výsledků, než fáze U, V (Obr. 3.38). Rozdíl naměřeného izolačního odporu na začátku a na konci, však dokazuje stejné zhoršení jako u ostatních dvou fází.

Důležitým výsledkem diagnostiky izolačního systému se stává koeficient DD. Test vybíjení dielektrika DD postupně roste s počtem zátěžových hodin. Největší změna je na fázi U. Z Tabulka 3.11 se dá označit stav izolace u fází V, W za nejasný, u fáze U za špatný. Na konci měření dosahují hodnoty u všech fází nad 4,5, při takových hodnotách se izolační systém kvalifikuje jako špatný. Tyto výsledky dokazují opotřebení některé z vrstev izolačního systému.

Komplexním shrnutím všech výsledků je možno říci, že izolační systém motoru, při dočasném zatěžování rychle degradoval a horšil svůj celkový stav.

Číselné zhodnocení a přehled jednotlivých výsledků fází se nachází v Tabulka 3.20, Tabulka 3.21, Tabulka 3.22.

Tabulka 3.20 Naměřené výsledky fáze U

t	I	R	DAR	PI	C	DD
(hod)	(nA)	(GΩ)	(-)	(-)	(μF)	(-)
0	17,84	28,47	1,1	1,17	0,001	4,28
2	16,89	30,08	1,1	1,05	0,001	4,62
4	31,36	16,2	1,06	1,08	0,001	5,01
6	31,56	16,1	1,06	1,08	0,001	5,02
8	33,5	15,17	1,06	1,08	0,001	5,19

Tabulka 3.21 Naměřené výsledky fáze V

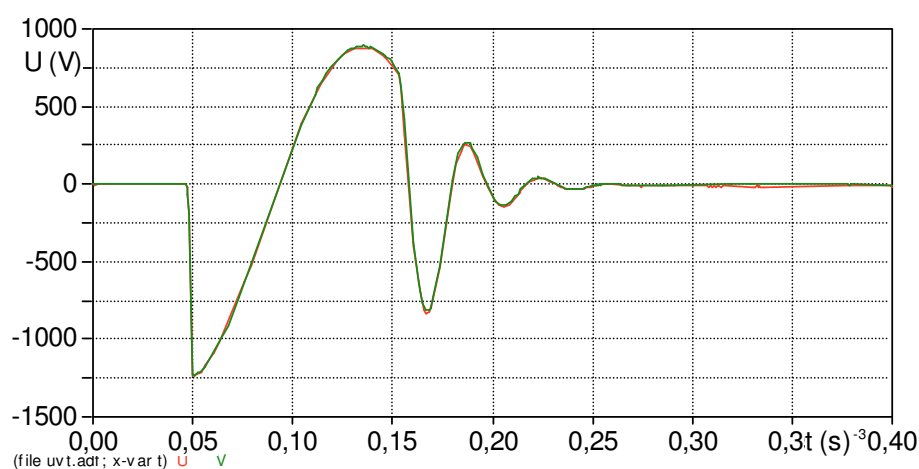
t	I	R	DAR	PI	C	DD
(hod)	(nA)	(GΩ)	(-)	(-)	(μF)	(-)
0	17,43	29,16	1,09	1,1	0,001	3,87
2	17,54	28,96	1,11	1,09	0,001	4,68
4	29,71	17,1	1,06	1,1	0,001	4,66
6	31,18	16,29	1,06	1,09	0,001	4,55
8	30,12	16,87	1,06	1,09	0,001	4,65

Tabulka 3.22 Naměřené výsledky fáze W

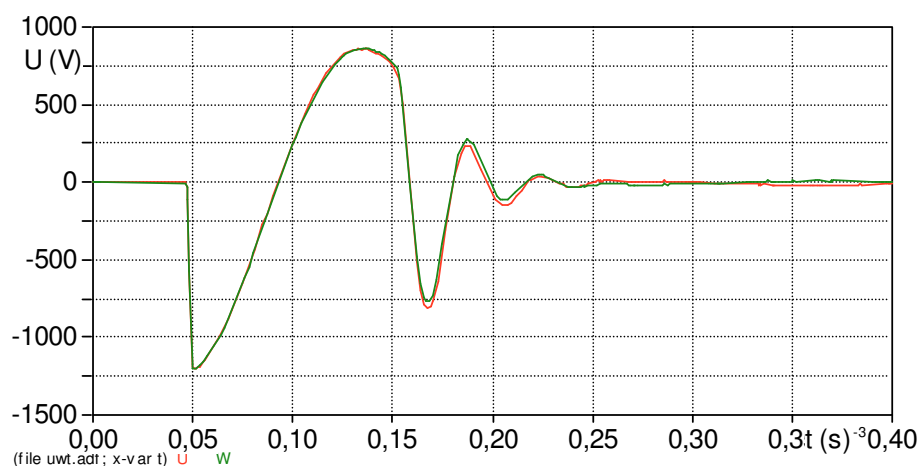
t	I	R	DAR	PI	C	DD
(hod)	(nA)	(GΩ)	(-)	(-)	(μF)	(-)
0	15,01	33,86	1,09	1,1	0,001	3,58
2	13,93	36,48	1,11	1,11	0,001	3,83
4	25,08	20,26	1,07	1,09	0,001	4,34
6	22,28	22,81	1,08	1,1	0,001	4,21
8	24,54	20,71	1,07	1,1	0,001	4,48

3.7.1 Impulsní srovnávací zkouška po 8 hodinách v zatíženém stavu

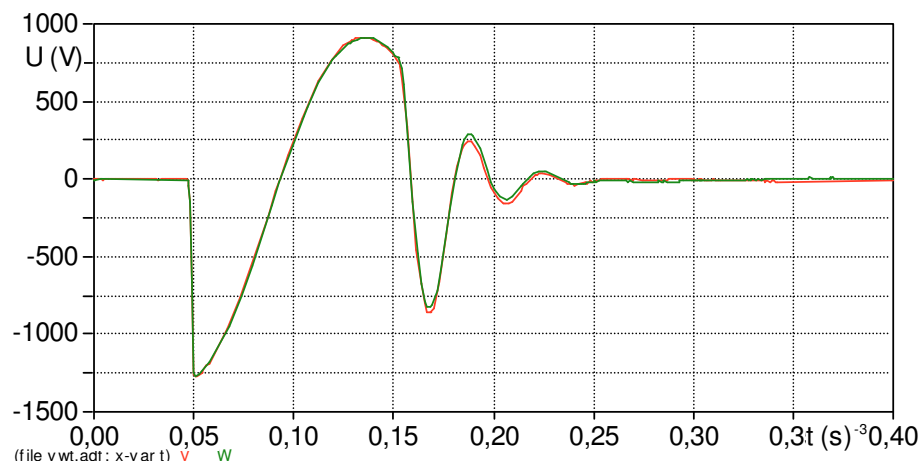
Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, byl motor zatěžován pomocí pružinové brzdy 2LM8. Tato brzda fyzicky brzdila hřídel motoru, čímž vznikala reakční síla v drážkách motoru jednotlivých vinutí. Namáhání vinutí jednotlivých fází bylo oproti jmenovitému zatížení větší o 18 %. Vezme-li se v úvahu síla působící na vinutí společně s teplem vznikající procházejícím proudem, mohly tyto podmínky vyvolat poruchu např. v podobě mezi-závitového zkratu. Výsledek impulsní srovnávací zkoušky jsou uvedeny na Obr. 3.39, Obr. 3.40, Obr. 3.41.



Obr. 3.39 Časový průběh napětí fáze U, V

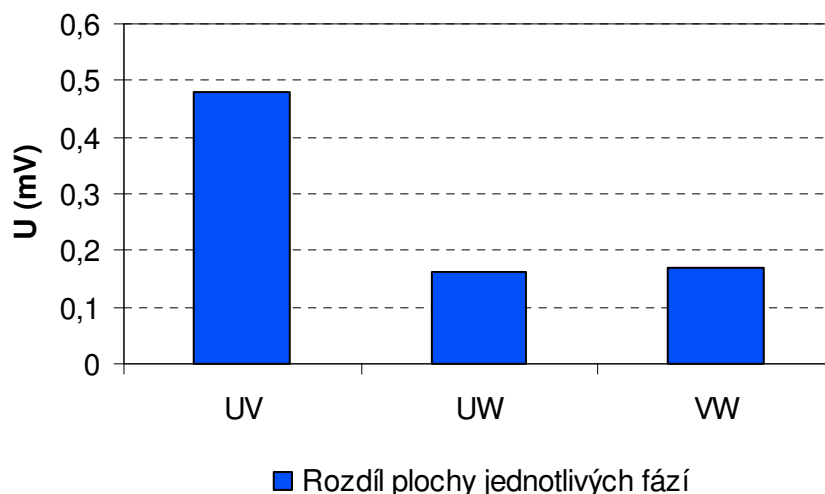


Obr. 3.40 Časový průběh napětí fáze U, W



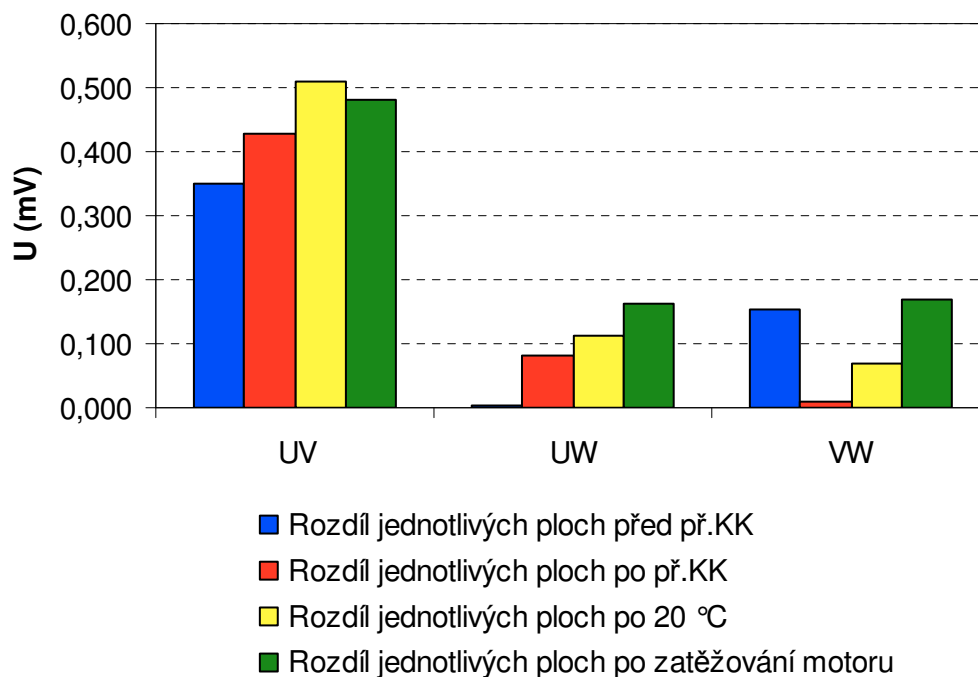
Obr. 3.41 Časový průběh napětí fáze V, W

Impulsní srovnávací zkouška neprokázala zásadní změnu ve vinutí jednotlivých fází. Na Obr. 3.40 je možno vidět mírné rozkmitání v čase 0,2 ms. Jinak jsou však vinutí v souladné, přesné odezvě, tudíž nevykazují žádnou poruchu.



Obr. 3.42 Rozdíl ploch jednotlivých fází

Změny nastalé vlivem zatěžování asynchronního motoru se projeví porovnáním ploch. Na Obr. 3.43 jsou vyneseny všechny vyhotovené rozdíly jednotlivých fází. Rozdíl ploch mezi fázemi U, V rostl, až do zatěžování asynchronního motoru. Rozdíl plochy mezi fázemi U, W a V, W je téměř stejný, potom můžeme tvrdit, že nejhorší výsledek má fáze V. Mírné zhoršení zaznamenala fáze U a W. Ze změřených výsledků se nedá s určitostí říci zda dojde k poruše na některé fázi. Současný stav však nasvědčuje, že pokud by k poruše mělo dojít, s největší pravděpodobností by došlo k poruše na vinutí fáze V. Všechny vynesené výsledky v Obr. 3.43 jsou v Tabulka 3.23.



Obr. 3.43 Porovnání rozdílu ploch jednotlivých fází

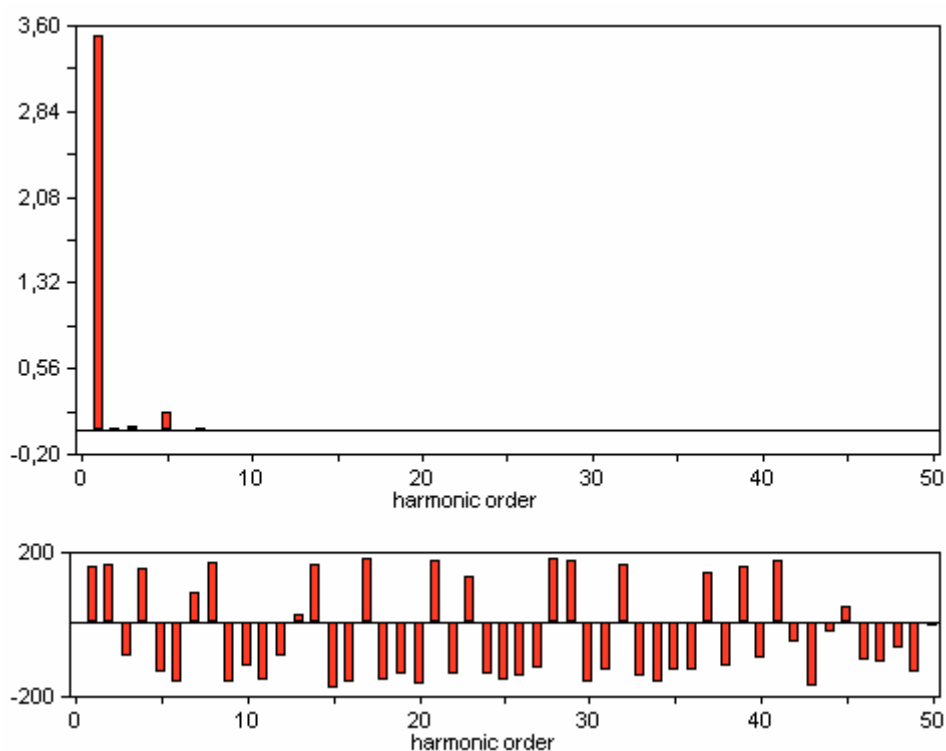
Tabulka 3.23 Rozdíl ploch

Stav	Rozdíl plochy		
	UV	UW	VW
	(mV)	(mV)	(mV)
- 20 °C	0,350	0,004	0,152
40 °C	0,430	0,080	0,009
20 °C	0,510	0,111	0,069
Při zatížení	0,482	0,162	0,168

3.8 Proudová spektra asynchronního motoru nakrátko při chodu naprázdno

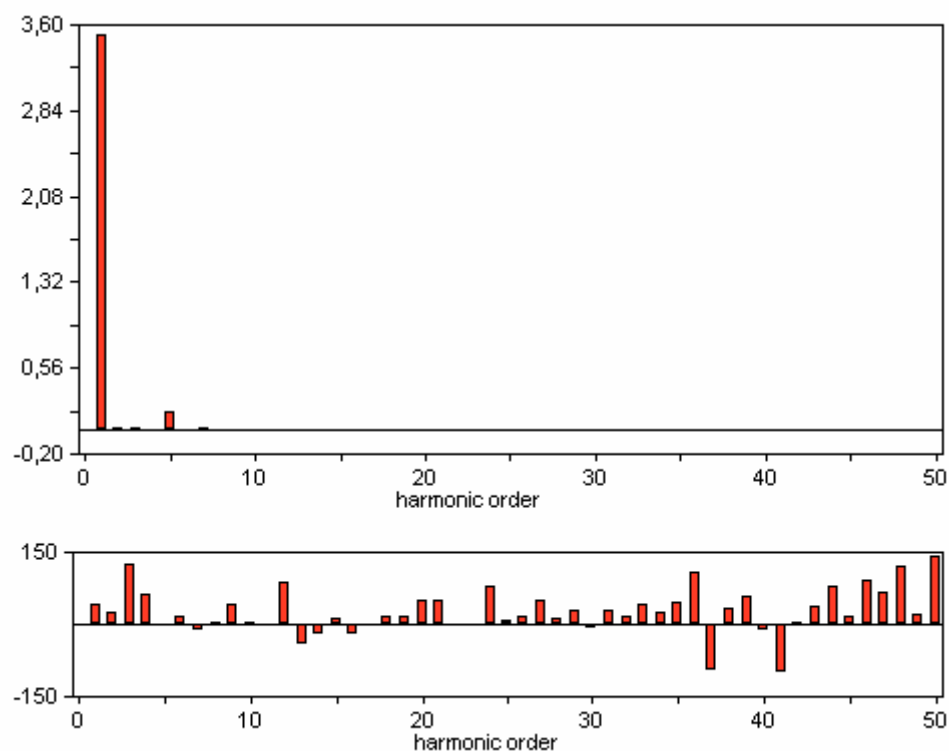
Při měření asynchronního motoru nakrátko při chodu naprázdno bylo použito proudové sondy Chauvin Arnoux C 160, která byla napojena na osciloskop YOKOGAWA. Pro měření byla vzorkovací frekvence nastavena na 10ks/s s délkou záznamu 100 ms. Tato délka záznamu odpovídá 5 zaznamenaným periodám.

I když je motor spuštěn naprázdno, může generovat celou škálu vyšších harmonických do sítě. Na Obr. 3.44, Obr. 3.45, Obr. 3.46 jsou znázorněna spektra harmonických složek jednotlivých fází.

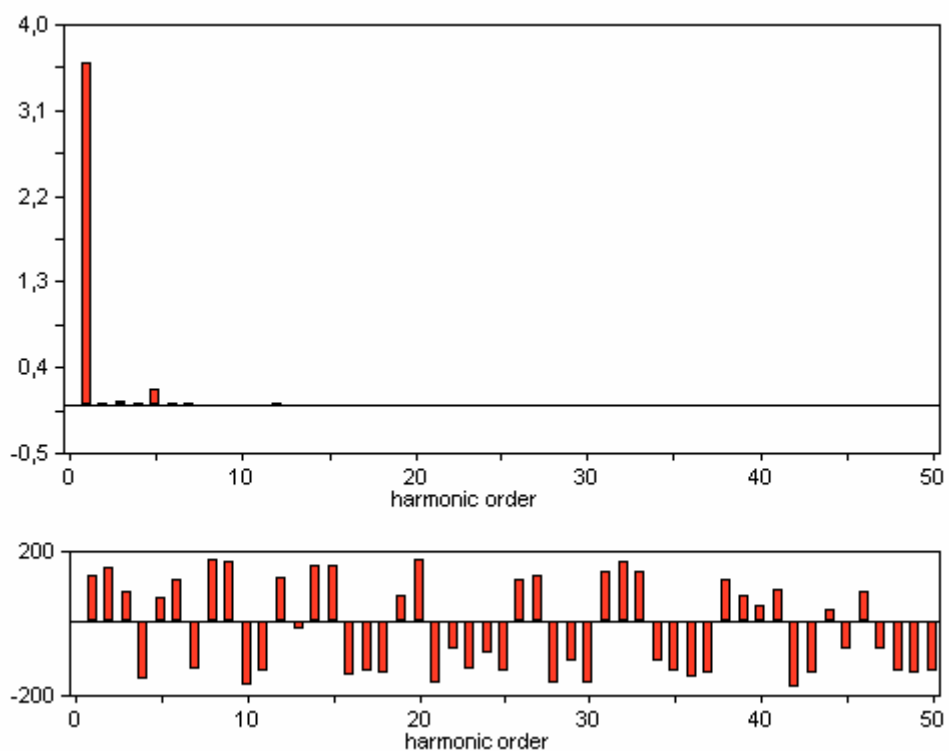


Obr. 3.44 Spektrum harmonických složek proudu fáze U

Při chodu asynchronního motoru naprázdno se projevují harmonické vyšších řádů 2, 3, 5, 7. Tyto výsledky se shodují u všech fází. Nejdominantnější harmonickou složkou vyššího řádu je pátá harmonická. Její velikost je 4,8 % u fáze U, 4,7 % u fáze V, 4,3 % u fáze W, vůči 1 harmonické o frekvenci 50 Hz. Všechny změřené hodnoty jednotlivých harmonických složek jsou uvedeny v Tabulka 3.24, Tabulka 3.25, Tabulka 3.26. Odpovídající kompatibilní úroveň pro celkové harmonické zkreslení THD nesmí překročit 8 %. Tato podmínka byla dodržena.



Obr. 3.45 Spektrum harmonických složek proudu fáze V



Obr. 3.46 Spektrum harmonických složek proudu fáze W

Tabulka 3.24

Harm.	Amplituda	Fáze
	(mA)	(deg)
0	-2,5461	0
1	3504,2	159,92
2	24,348	165,63
3	44,621	-93,291
4	7,3251	152,85
5	168,98	-138,62
6	9,6119	-161,95
7	15,953	85,809
8	5,4544	171,88
9	5,8877	-162,07
10	2,5194	-121,99
11	9,1889	-158,56
12	9,0716	-91,999
13	1,9737	24,276
14	3,7601	165,37
15	3,6261	-178,43
16	3,1239	-163,83
17	1,8678	178,01
18	2,9163	-158,13
19	2,4726	-139,56
20	2,9159	-167,34
21	0,90792	176,87
22	2,7502	-143,62
23	0,47789	130,28
24	2,2822	-140,74
25	1,2268	-157,96
26	2,0531	-146,81
27	1,9037	-122,46
28	1,4426	179,34
29	1,8284	174,96
30	1,2837	-166,51

Tabulka 3.25

Harm.	Amplituda	Fáze
	(mA)	(deg)
0	-9,3635	0,00
1	3506,7	40,20
2	17,674	24,27
3	25,734	124,57
4	3,5434	58,74
5	165,6	-8,10
6	7,7743	13,73
7	28,824	-14,87
8	5,6532	1,20
9	7,8816	37,67
10	5,4964	1,02
11	8,6122	-1,85
12	6,1271	86,14
13	6,6302	-44,49
14	0,74057	-21,91
15	2,291	10,95
16	3,1128	-22,38
17	1,7474	-2,50
18	2,371	13,56
19	2,1766	15,59
20	1,5792	47,95
21	2,5114	48,32
22	1,7013	-3,91
23	1,9281	-7,20
24	1,3566	75,08
25	2,7861	4,84
26	2,7235	13,45
27	1,2669	49,23
28	1,9352	11,58
29	1,8711	26,42
30	1,3606	-8,43

Tabulka 3.26

Harm.	Amplituda	Fáze
	(mA)	(deg)
0	-16,131	0
1	3592	128,57
2	18,7	154,43
3	25,807	85,66
4	8,4247	-158,83
5	154,79	69,506
6	4,9414	121,9
7	23,541	-133,26
8	3,0633	177,63
9	2,2647	170,88
10	3,1609	-177,55
11	3,991	-135,81
12	7,9498	122,89
13	4,0598	-19,532
14	2,4293	159,26
15	2,0469	157,68
16	1,8856	-145,78
17	1,1947	-138,22
18	1,5415	-139,98
19	1,1864	75,458
20	1,3283	175,16
21	1,7571	-168,67
22	0,66701	-73,859
23	1,0821	-132,26
24	1,0352	-83,495
25	1,2626	-133,96
26	0,47511	118,7
27	0,45664	129
28	0,64963	-171,81
29	1,4305	-108,36
30	1,619	-168,81

Tabulka 3.27 THD

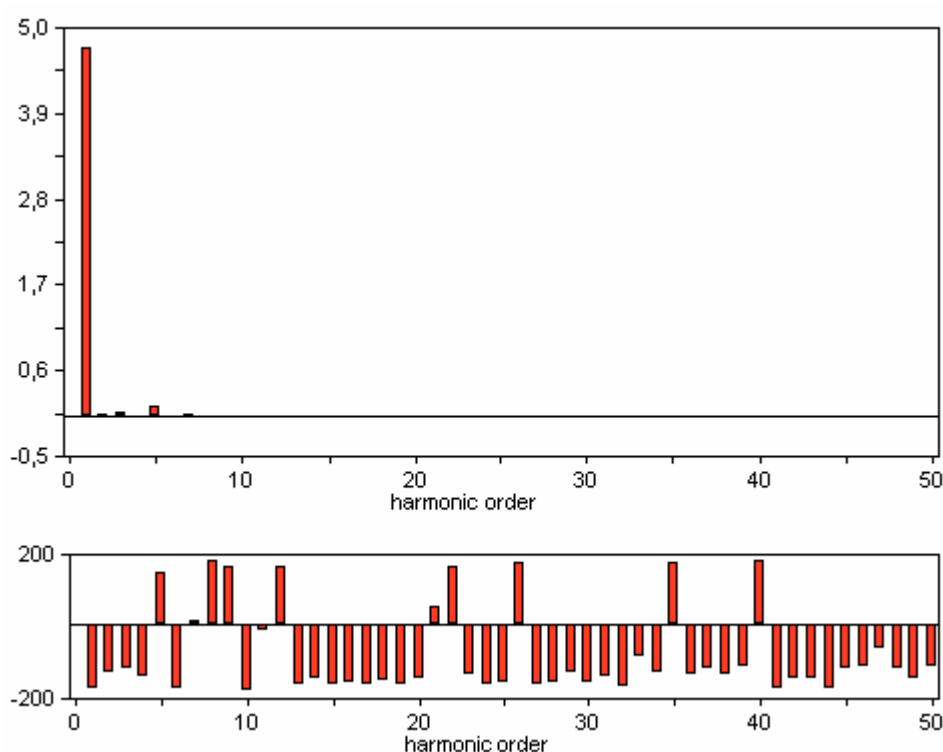
Činitel zkreslení	
Fáze	(%)
U	5,09
V	4,91
W	4,47

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \left(\frac{Q_h}{Q_1} \right)^2}$$

[8](17)

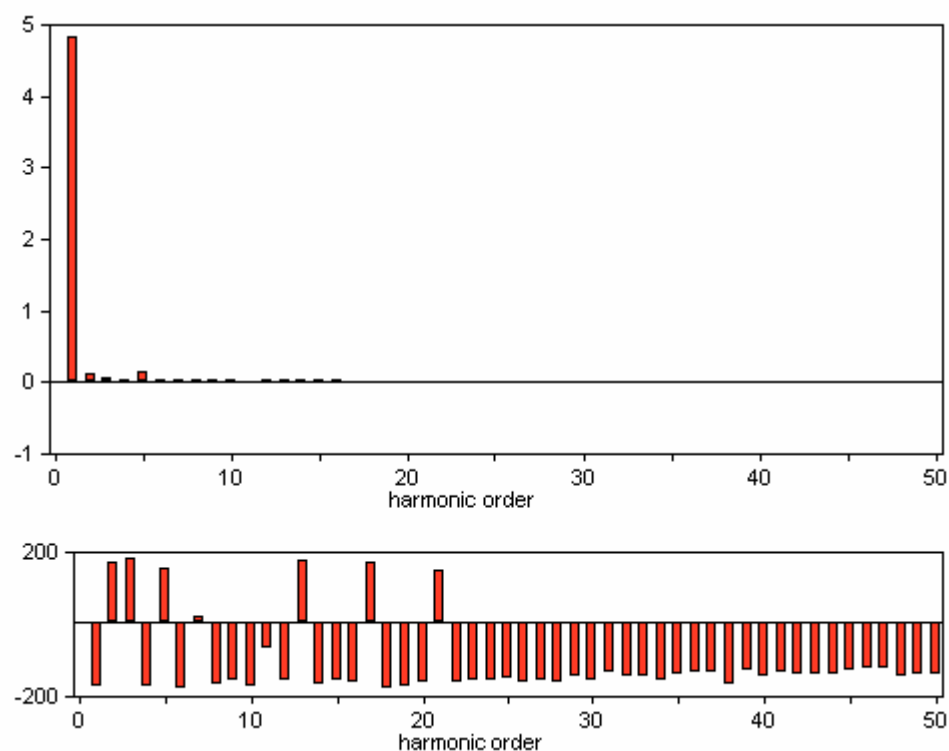
3.9 Proudová spektra asynchronního motoru nakrátko v zatíženém stavu

Proudová spektra asynchronního motoru nakrátko v zatíženém stavu byla měřena stejně jako v předchozí kapitole. Stejně jako v předchozím případě se nejvíce projevují 2, 3, 5, 7. Na rozdíl od výsledků změřených při stavu naprázdno, se v zatíženém stavu potlačila 5 harmonická. Na změřených průbězích fáze U můžeme vidět podobné spektrum harmonických složek jako při zatížení naprázdno. Ovšem u fází V, W, se v zatíženém stavu začíná projevovat mnohem širší spektrum harmonických složek, než v předchozím případě. Nejvíce patrné je to u fáze W.

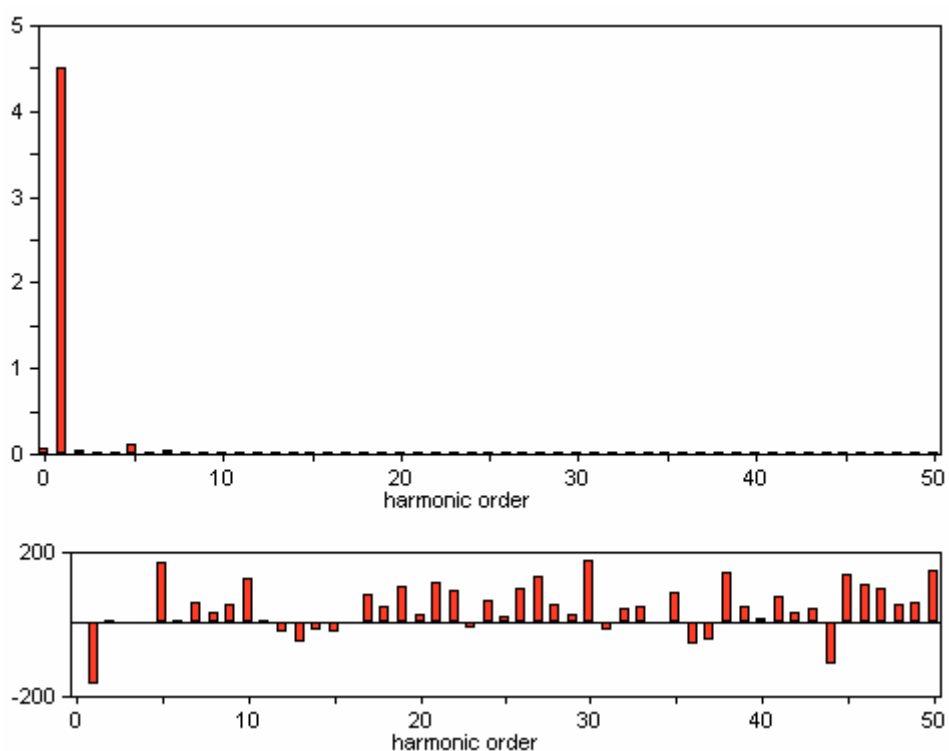


Obr. 3.47 Spektrum harmonických složek fáze U

V Tabulka 3.28, Tabulka 3.29, Tabulka 3.30 jsou uvedeny velikosti jednotlivých vypočtených harmonických složek. Z Obr. 3.47, Obr 3.48, Obr 3.49 je vidět, že měřené spektrum se změní při zatížení motoru. V Tabulka 3.31 je uveden činitel zkreslení THD. Podle normy EN 61 000 – 2 – 2 nesmí překročit hodnota THD 8 %. Porovnáním výsledků z Tabulka 3.27 a Tabulka 3.31 vyplývá, že motor v zatíženém stavu generuje menší zkreslení, než ve stavu naprázdno. Ze změřených a vypočtených výsledků je možno tvrdit, že motor nepřekračuje ani v jednom případě maximální přípustné hodnoty stanovené normou.



Obr 3.48 Spektrum harmonických složek fáze V



Obr 3.49 Spektrum harmonických složek fáze W

Tabulka 3.28

Harm.	Amplituda	Fáze
	(mA)	(deg)
0	-6,700	0
1	4733	-173,64
2	36,69	-129,53
3	47,31	-116,94
4	8,764	-144,37
5	127,9	146,07
6	12,88	-172,64
7	30,11	16,63
8	5,784	179,25
9	10,46	164,64
10	6,010	-178,21
11	13,85	-13,394
12	2,697	161,25
13	8,568	-162,9
14	4,933	-146,16
15	2,304	-162,2
16	2,506	-158,72
17	0,667	-164,31
18	3,063	-155,04
19	2,528	-162,64
20	3,727	-148,37
21	3,681	50,922
22	0,238	165,75
23	4,169	-135,69
24	2,805	-162,99
25	1,192	-157,38
26	2,573	173,55
27	2,921	-165,3
28	2,116	-158,85
29	0,917	-131,82
30	1,447	-155,83

Tabulka 3.29

Harm.	Amplituda	Fáze
	(mA)	(deg)
0	-6,080	0
1	4813	-173,3
2	99,86	170,41
3	40,55	179,26
4	32,28	-173,33
5	133,6	151,51
6	23,13	-178,78
7	15,26	21,609
8	15,18	-168,44
9	20,37	-159,97
10	14,79	-175,58
11	3,410	-71,226
12	10,11	-157,86
13	19,78	176,8
14	10,64	-167,34
15	9,458	-156,46
16	9,575	-162,44
17	7,825	168,55
18	6,984	-177,86
19	4,609	-174,13
20	6,946	-166,21
21	4,787	146,01
22	6,086	-163,91
23	8,326	-157,75
24	6,895	-155,69
25	5,280	-152,35
26	4,821	-165,61
27	6,304	-158,62
28	5,773	-163,88
29	4,683	-148,62
30	6,215	-158,85

Tabulka 3.30

Harm.	Amplituda	Fáze
	(mA)	(deg)
0	49,08	0
1	4504	-169,15
2	31,81	7,0829
3	21,89	1,4244
4	9,792	-5,0505
5	111,5	171,95
6	5,304	9,4443
7	36,80	57,317
8	3,555	32,9
9	3,354	54,1
10	0,133	122,68
11	7,143	9,1256
12	4,410	-22,45
13	6,516	-51,329
14	2,049	-16,844
15	3,123	-25,657
16	2,320	0,48253
17	0,749	78,785
18	2,748	45,398
19	0,914	101,7
20	0,760	22,837
21	4,221	116,11
22	0,278	92,247
23	1,490	-15,405
24	1,020	63,874
25	1,996	20,778
26	0,775	96,877
27	0,370	128,97
28	0,596	52,365
29	0,948	26,212
30	0,445	172,59

Tabulka 3.31 THD

Činitel zkreslení	
Fáze	(%)
U	3,12
V	3,8
W	2,77

3.10 Měření naprázdno a nakrátko při jmenovitých hodnotách

V kapitole 3.5 byl popsán problém přehřátí klimatické komory na nedovolenou mez. Pro doplnění obrazu diagnostiky motoru bylo provedeno měření naprázdno, nakrátko při jmenovitých hodnotách. Tímto měřením se určily činné ztráty motoru a hodnoty uvedené v Tabulka 3.33, Tabulka 3.34. Z hodnot uvedených v tabulkách níže je patrné, že motor má vzhledem ke svému jmenovitému výkonu poměrně velké činné ztráty naprázdno. Záběrný proud je roven 3,26 násobku jmenovitého proudu.

Tabulka 3.32 Rezistance vinutí

v	R_U	R_V	R_W	$R_{stř}$
(°C)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
20	7,75	7,74	7,75	7,75
40	8,358	8,347	8,358	8,358

Tabulka 3.33 Změřené a vypočtené hodnoty naprázdno

U_0	I_U	I_V	I_W	$I_{0stř}$	P_U	P_V	P_W	P_0	$\cos \varphi_0$	P_m	ΔP_{Cu10}	ΔP_{Fe}
(V)	(A)	(A)	(A)	(A)	(W)	(W)	(W)	(W)	(-)	(W)	(W)	(W)
400	2,6	2,53	2,53	2,553	90	90	70	250	0,141	18	81,73	150,3

Tabulka 3.34 Změřené a vypočtené hodnoty nakrátko

I_U	I_V	I_W	$I_{stř}$	U_K	P_U	P_V	P_W	P_K	$\cos \varphi_K$	I_{KS}	P_{KS}	P_{Cu10KS}
(A)	(A)	(A)	(A)	(V)	(W)	(W)	(W)	(W)	(-)	(A)	(W)	(W)
2,95	2,97	3,14	3,02	122,4	150	158	153	461	0,720	9,641	4923	1165

Příklad výpočtu:

$$R_{U40} = R_{U20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta) = 7,75 \cdot (1 + 3,95 \cdot 10^{-3} \cdot 20) = 8,358 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (18)$$

$$R_{20stř} = \frac{1}{3} \cdot (R_U + R_V + R_W) = \frac{1}{3} \cdot (7,75 + 7,74 + 7,75) = 7,75 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (19)$$

$$I_{0stř} = \frac{1}{3} \cdot (I_U + I_V + I_W) = \frac{1}{3} \cdot (2,6 + 2,53 + 2,53) = 2,553 \text{ (A)} \quad (20)$$

$$\Delta P_{CU10} = 1,5 \cdot R_{40stř} \cdot I_0^2 = 1,5 \cdot 8,35 \cdot 2,553^2 = 81,73 \text{ (W)} \quad (21)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 2,553} = 0,141 \text{ (-)} \quad (22)$$

$$\Delta P_{Fe} = P_0 - \Delta P_{CU10} - P_m = 250 - 81,73 - 18 = 150,3 \text{ (W)} \quad (23)$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_N} = \frac{461}{\sqrt{3} \cdot 122,4 \cdot 3,02} = 0,72 \quad (-) \quad (24)$$

$$I_{KS} = I_N \cdot \frac{U_N}{U_K} = 2,95 \cdot \frac{400}{122,4} = 9,64 \quad (\text{A}) \quad (25)$$

$$P_{CU10KS} = 1,5 \cdot R_{40str} \cdot I_{KS}^2 = 1,5 \cdot 8,358 \cdot 9,64^2 = 1165 \quad (\text{W}) \quad (26)$$

$$P_{KS} = P_K \cdot \left(\frac{U_N}{U_K} \right)^2 = 461 \cdot \left(\frac{400}{122,4} \right)^2 = 4923 \quad (\text{W}) \quad (27)$$

Pro přesnější určení ztrát v železe je třeba znát mechanické ztráty. Tyto ztráty byly zjištěny aproximací křivky tvořené změřenými hodnotami činného výkonu, při nastavených hodnotách napětí od 20 – 120 % napětí po 10 %.

Pro měření ztrát naprázdno, nakrátko byly použity tyto přístroje:

Proudová sonda – CHAUVIN ARNOUX C 160

v.č. 140526

Klešťový multimetr – CHAUVIN ARNOUX F 09

v.č. 119362

v.č. 119363

REG. AUTOTRANSFORMÁTOR RA 3 x 10

v.č. 452890

4 Závěr

V každém elektroenergetickém zařízení má izolační systém velkou úlohu. Izolační systém je složitý systém různých elektrických izolantů. Pro správné fungování elektrického zařízení je správně navržený izolační systém naprosto stěžejní. Chování a vlastnosti různých izolantů se navzájem mění v závislosti na teplotě a vlhkosti okolí. Tato skutečnost způsobuje, že některá elektroenergetická zařízení nemusejí vydržet vlivem extrémního teplotního působení okolí při jmenovitém zatížení. Diagnostikou izolačního systému energetického zařízení v různých klimatických podmínkách se vyšetřovaly změny vyvolané zatížením asynchronního motoru 1,1 kW 1LA7096-6AA10-Z naprázdno, nakrátko v izolačním systému.

Použitý asynchronní motor s kotvou nakrátko je vybaven pružinovou brzdou 2LM8. Použitý asynchronní motor je šesti-pólový s teplotní třídou izolace F s oteplením ve třídě B. Dle výrobce je motor schopen práce v rozmezí teplot od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro trvalé zatížení v S1. Izolační systém je tvořen plošnými izolačními materiály ve spojení s bezrozpuštědlovou pryskyřičnou impregnací.

Asynchronní motor měl být vystaven extrémním teplotám v prostředí uměle vytvořeném za pomoci klimatické komory. Klimatická komora je schopna generovat teploty od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Každé měření bylo prováděno za ustálených teplot.

Na samém počátku měření byl proveden prvotní test izolačního systému, kde byly snímány hodnoty zdánlivého izolačního odporu, polarizačního indexu, koeficientu dielektrické absorpce, proudu, testu vybíjení dielektrika a kapacity. Hodnoty ukazovaly na poměrně špatný stav izolačního systému. Mezi hodnoty ukazující špatný stav patřil především PI, DAR, DD, které ukazují na navhlou a nečistou izolaci.

Uvedením asynchronního motoru do extrémně nízkých teplot $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, došlo ke zlepšení hodnocených parametrů. Ze zpracovaných výsledků je patrné, že nízká teplota zmrazí jednotlivé složky izolačního systému a způsobí zlepšení izolačních vlastností. Při velmi nízkých teplotách dochází k zmrazení malých částí vysrážené vlhkosti (kapaliny) uvnitř stroje, z které se stávají malé fragmenty ledu. Tyto malé ledové fragmenty znamenají přerušení možné vodivé cesty v izolačním systému, proto byly naměřeny lepší výsledky izolačního systému. Dá se tedy předpokládat, že čím nižší bude teplota, tím lepší budou parametry izolačního systému. Po ukončení měření při nízké teplotě se zdánlivý izolační odpor opět vrací na svou původní hodnotu. Měření a chod asynchronního motoru v nízkých teplotách nemělo vliv na mezi-závitovou izolaci.

Chod asynchronního motoru naprázdno v teplotách vyšších než $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebyl proveditelný, což dokazuje drobná havárie klimatické komory v režimu topení. V tomto režimu došlo k přehřátí klimatické komory na nepovolenou mez. Výsledky hodnocených parametrů po neplánovaném vystavení asynchronního motoru teplotě $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ způsobilo velký skok v hodnotách zdánlivého

izolačního odporu jednotlivých fází o jeden celý řád. Před nehodou se výsledky zdánlivého izolačního odporu pohybovaly v řádu jednotek $G\Omega$, ovšem po havárii vykazovaly hodnoty desítek $G\Omega$. Byly však patrné negativní změny. Mezi signály těchto změn patří zhoršení hodnot DD. Kvalita izolačního systému jako celku se nezlepšila, míra nečistoty díky vlhkosti nebo jiným nečistotám byla stále poměrně velká. Vlivem vysoké teploty motoru a minima odvodu tepla z prostoru klimatické komory došlo k vypčení některých složek izolačního systému a ke spečení některých vrstev izolačního materiálu. Chod motoru v přehřáté klimatické komoře neměl vliv na vinutí a na stav mezi-závitové izolace.

Vystavení asynchronního motoru klimatizované teplotě 20 °C přineslo očekávané výsledky. Vliv na izolační systém je téměř minimální a hodnoty parametrů izolačního systému se příliš nemění. Izolační systém asynchronního motoru je velice náchylný na velikost relativní vlhkosti. Dokazují to porovnané výsledky PI, DAR s naměřenou mírou relativní vlhkosti v klimatické komoře. Impulsní srovnávací zkouška neprokázala poruchu na vinutí. Projevily se známky opotřebenosti a malé změny izolačního stavu mezi-závitové izolace. Tyto změny se ovšem nedají považovat za předzvěst poruchy, neboť každá impulsní srovnávací zkouška znamená malé opotřebenosti izolačního systému.

Jelikož simulace zatížení asynchronního motoru byla prováděna pomocí pružinové brzdy 2LM8, docházelo k neustálému vyvíjení tepla. Tento vývin tepla byl větší než chladicí výkon klimatické komory. Další měření a namáhání asynchronního motoru muselo být prováděno v klimatickém prostředí samotné laboratoře. Za normálních podmínek se asynchronní motor ve stavu naprázdno vyhřál a teplotně ustálil na 40 °C. V zatíženém stavu se teplota povrchu motoru pohybovala okolo 70 °C. Tyto podmínky měly za následek rychlejší degradaci celého izolačního systému. K dosažení přesnějšího měření bylo třeba nechat motor po odpojení zátěže vychladnout. Komplexní namáhání asynchronního motoru dokázalo, že následkem vysoké teploty se v izolačním systému zhoršují parametry izolačního systému a dochází k nezvratným změnám. Na rozdíl od všech předešlých měření s výjimkou měření při 40 °C, se při měření v zatíženém stavu hodnoty zdánlivého izolačního odporu nevrátily na původní hodnotu. Po konstrukční stránce se začaly projevovat negativní dopady teploty a momentové namáhání hřídele v podobě zvýšeného hluku. Výsledky získané impulsní srovnávací zkouškou opět neprokázaly poruchu statorového vinutí v podobě mezi-závitového zkratu.

Proudové spektrum zkoušeného asynchronního motoru generuje harmonické vyššího řádu především 3, 5, 7. Jak ve stavu naprázdno, tak ve stavu zatíženém je nejvíce dominantní 5 harmonická. Ani v jednom případě nepřekračuje jakákoli harmonická limit stanovený normou EN 61 000-2-2. Vypočtený činitel zkreslení THD taktéž není větší jak 8 %. Velikost činitele zkreslení THD je v zatíženém stavu menší, než ve stavu naprázdno. To potvrzuje útlum 5 harmonické v zatíženém stavu.

Zkoušený asynchronní motor patří mezi sériově vyráběné motory pro pohon průmyslových zařízení např. ventilátorů, čerpadel, obráběcích strojů. Ze štítkových parametrů je patrné, že motor není příliš ekonomický. Jako značný problém tohoto typu motoru by mohla být vyvíjená teplota v zatíženém stavu a špatná účinnost 72 %. Velikost účinníku 0,77 způsobuje, že motor odebírá nemalý jalový výkon. Měření ztrát naprázdno a nakrátko při jmenovitých hodnotách potvrzuje parametry uvedené v katalogové nabídce motoru. Tímto měřením byly zjištěny ztráty v železe, které dosahují hodnoty 150,3 W. Takto vysoké ztráty jsou hlavní příčinou vyšší teploty asynchronního motoru ve stavu naprázdno.

Celkovým shrnutím je možno říci, že klimatické podmínky mají velký vliv na izolační systém. Parametry izolačního systému se mění v závislosti na teplotě. V případě zkoušeného asynchronního motoru 1LA7 byl izolační systém od počátku znečištěn vlhkostí, což dokazují hodnoty PI, DAR, které se dají hodnotit stavem nedostatečným nebo nebezpečným. V takovém případě je izolační systém velice náchylný na relativní vlhkost prostředí. Tato náchylnost se potom projeví jako kolísání hodnot zdánlivého izolačního odporu vzhledem k velikosti relativní vlhkosti. Nejvíce patrné změny zdánlivého izolačního odporu se projeví při měření v 20 °C. Změřené hodnoty PI, DAR na začátku a konci celého měření se nezměnily.

Velikost zdánlivého izolačního odporu se měnila v závislosti na teplotě. Při vzrůstající teplotě se zdánlivý izolační odpor zmenšoval a s klesající teplotou se naopak zvyšoval. Čím více bude klesat teplota pod bod mrazu, bude se projevovat efekt zmrazených fragmentů jednotlivých izolačních složek, tedy izolační schopnost celého systému bude stoupat. V takových podmínkách bude izolační systém spolehlivě pracovat. Zvýšená teplota okolí a vysoká teplota okolí má na izolační systém negativní účinky. Dochází ke zhoršení a trvalým změnám parametrů izolačního systému.

5 Seznam použité literatury

- [1] *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. Věšínova 5, Praha 10 : BEN, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. Věšínova 5, Praha 10 : BEN, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6
- [3] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. Legerova 61, 120 00 Praha 2 : Academia, 2005. 140 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [4] CHMELÍK, Karel; ZÁLIŠ, Karel; MIŠÁK, Stanislav; KOZELSKÝ, Jiří. *Technická diagnostika na elektrických zařízeních*. Elektronické studijní podpory.
- [5] *Katalog K02 – 0409 CZ*. 26 s. Dostupné z WWW :<<http://www.elektromotory.com/Portals/0/1LA7.pdf>>.
- [6] *Návod Siemens pružinová brzda 2LM8 005 – 1NA10..... 2LM8 400 – 0NA10*. Siemens AG, 2003. 20 s.
- [7] *Návod k obsluze megohmmetru CA 6547*. Kounicova 67a 602 00 Brno :. 30 s.
- [8] Česká republika. Elektromagnetická kompatibilita (EMC). In *EN 61 000-2-2*. 2003, 310, s. 28.

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Voltampérová metoda pro měření odporu.....	2
Obr. 1.2 Vliv šířky pásma transformace na výsledný průběh RRK a jim odpovídající lineární náhrady: a) příliš dlouhý interval, b) optimální volba časových mezí.....	4
Obr. 1.3 Zobrazení lichoběžníkového pravidla pro vyjádření plochy pod absorpční nebo resorpční křivkou.....	5
Obr. 1.4 Znázornění poměrné odchylky od Ohmova zákona	6
Obr. 1.5 Průběhy ztrátového činitele v závislosti na napětí	8
Obr. 1.6 Blokové schéma testerů se strmou vlnou	10
Obr. 1.7 Vinutí U, V, W bez poruchy]	11
Obr. 1.8 Vinutí U s poruchou, 8x mezi-závitový zkrat	11
Obr. 1.9 Typická elektrodová uspořádání pro částečné výboje	12
Obr. 1.10 Základní zapojení pro měření částečných výbojů galvanickou metodou	14
Obr. 1.11 Zapojení pro měření částečných výbojů na kondenzátorové průchodce	15
Obr. 3.1 1,1 kW 1LA7-966A10-Z	23
Obr. 3.2 Momentová charakteristika	25
Obr. 3.3 Konstrukční plán asynchronního motoru	25
Obr. 3.4 Změna brzdného momentu	26
Obr. 3.5 Konstrukční uspořádání pružinové brzdy 2LM8 020	27
Obr. 3.6 Schéma zapojení vinutí motoru při měření	31
Obr. 3.7 Změřené hodnoty fáze U za 80 hodin.....	35
Obr. 3.8 Změřené hodnoty fáze V za 80 hodin.....	36
Obr. 3.9 Změřené hodnoty fáze W za 80 hodin.....	36
Obr. 3.10 Impulsní srovnávací zkouška fáze U, V	37
Obr. 3.11 Impulsní srovnávací zkouška fáze U, W	37
Obr. 3.12 Impulsní srovnávací zkouška fáze V, W	38
Obr. 3.13 Rozdíl ploch jednotlivých fází	38
Obr. 3.14 Izolační odpory před a po přehřátí KK.....	39
Obr. 3.15 Proudů před a po přehřátí KK	40
Obr. 3.16 DAR před a po přehřátí KK	41
Obr. 3.17 PI před a po přehřátí KK	41
Obr. 3.18 DD před a po přehřátí KK	42
Obr. 3.19 Průběhy izolačních odporů z měření před a po přehřátí KK	42
Obr. 3.20 Impulsní srovnávací zkouška fáze U, V po přehřátí KK.....	44
Obr. 3.21 Impulsní srovnávací zkouška fáze U, W po přehřátí KK.....	44
Obr. 3.22 Impulsní srovnávací zkouška fáze V, W po přehřátí KK.....	45
Obr. 3.23 Rozdíl ploch jednotlivých fází	45

Obr. 3.24 Porovnání rozdílů ploch jednotlivých fází	46
Obr. 3.25 Změřené hodnoty fáze U za 80 hodin.....	47
Obr. 3.26 Změřené hodnoty fáze V za 80 hodin.....	48
Obr. 3.27 Změřené hodnoty fáze W za 80 hodin.....	48
Obr. 3.28 Asynchronní motor 1LA7096-6AA10-Z.....	49
Obr. 3.29 Impulsní srovnávací zkouška fáze U, V	50
Obr. 3.30 Impulsní srovnávací zkouška fáze V, W	50
Obr. 3.31 Impulsní srovnávací zkouška fáze V, W	51
Obr. 3.32 Rozdíl ploch jednotlivých fází	51
Obr. 3.33 Porovnání rozdílů ploch jednotlivých fází	52
Obr. 3.34 Termovizní snímek asynchronního motoru v chodu naprázdno	53
Obr. 3.35 Termovizní snímek asynchronního motoru v zatíženém stavu	53
Obr. 3.36 Změřené hodnoty fáze U za 8 hodin.....	54
Obr. 3.37 Změřené hodnoty fáze V za 8 hodin.....	54
Obr. 3.38 Změřené výsledky fáze W za 8 hodin	55
Obr. 3.39 Impulsní srovnávací zkouška fáze U, V	57
Obr. 3.40 Impulsní srovnávací zkouška fáze U, W	57
Obr. 3.41 Impulsní srovnávací zkouška fáze V, W	58
Obr. 3.42 Rozdíl ploch jednotlivých fází	58
Obr. 3.43 Porovnání rozdílů ploch jednotlivých fází	59
Obr. 3.44 Spektrum harmonických složek proudu fáze U.....	60
Obr. 3.45 Spektrum harmonických složek proudu fáze V.....	61
Obr. 3.46 Spektrum harmonických složek proudu fáze W.....	61
Obr. 3.47 Spektrum harmonických složek fáze U.....	63
Obr. 3.48 Spektrum harmonických složek fáze V.....	64
Obr. 3.49 Spektrum harmonických složek fáze W	64

Seznam tabulek

Tabulka 1.1 Přehled diagnostických metod [3]	17
Tabulka 2.1 Přehled tepelných tříd pro izolační materiály [1]	21
Tabulka 3.1 Technická data zkoušeného motoru	24
Tabulka 3.2 Technická data zkoušeného motoru	24
Tabulka 3.3 Rozměry klimatické komory	28
Tabulka 3.4 Teplotní rozsah klimatické komory	28
Tabulka 3.5 Popis stránek řízení [8]	29
Tabulka 3.6 - Časové rozvržení testu motoru v různých klimatických podmínkách.....	30
Tabulka 3.7 Naměřené výsledky fáze U	33
Tabulka 3.8 Naměřené výsledky fáze V	33
Tabulka 3.9 Naměřené výsledky fáze W	34
Tabulka 3.10 Hraniční hodnoty	34
Tabulka 3.11 Hraniční hodnoty	34
Tabulka 3.12	40
Tabulka 3.13	40
Tabulka 3.14	40
Tabulka 3.15 Rozdíl ploch	46
Tabulka 3.16 Naměřené výsledky fáze U	49
Tabulka 3.17 Naměřené výsledky fáze V	49
Tabulka 3.18 Naměřené výsledky fáze W	49
Tabulka 3.19 Rozdíl ploch	52
Tabulka 3.20 Naměřené výsledky fáze U	56
Tabulka 3.21 Naměřené výsledky fáze V	56
Tabulka 3.22 Naměřené výsledky fáze W	56
Tabulka 3.23 Rozdíl ploch	59
Tabulka 3.24	62
Tabulka 3.25	62
Tabulka 3.26	62
Tabulka 3.27 THD	62
Tabulka 3.28	65
Tabulka 3.29	65
Tabulka 3.30	65
Tabulka 3.31 THD	65
Tabulka 3.32 Rezistance vinutí	66
Tabulka 3.33 Změřené a vypočtené hodnoty naprázdno	66
Tabulka 3.34 Změřené a vypočtené hodnoty nakrátko.....	66